Д. М. КАЗАРНОВСКИЙ

СЕГНЕТОКЕРАМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ЭС—5—3

Книга содержит краткое изложение физических представлений о структуре и поляризации сегнетокерамики, а также основные сведения о конструкции, расчете, технологии изготовления и методике испытания сегнетоконденсаторов.

Книга предназначена для инженеров, конструкторов и работников лабораторий, сталкивающихся в своей деятельности с вопросами изготовления и использования сегнетоконденсаторов в электротехнических и радиотехнических устройствах. Книга может быть использована также студентами старших курсов соответствующих специальностей в качестве учебного пособия.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Появление керамического материала—титаната бария, обладающего сверхвысокой диэлектрической проницаемостью и свойствами нелинейного диэлектрика, послужило началом развития керамических конденсаторов нового типа—сегнетоконденсаторов. Вскоре после открытия титаната бария были найдены и исследованы также и другие керамические материалы, обладающие аналогичными свойствами. Одновременно были выпущены сегнетоконденсаторы различного назначения, в том числе конденсаторы для усилителей, умножителей частоты и других видов аппаратуры.

Несмотря на большое количество работ, посвященных титанату бария и другим керамическим сегнетоэлектрикам, результаты, полученные в области сегнетоконденсаторов, еще недостаточно систематизированы. В литературе пока еще слабо освещены технические виды сегнетокерамики и их электрические свойства, вопросы конструкции, расчета и испытаний сегнетоконденсаторов, несмотря на то, что в настоящее время широкий круг научных работников и инженеров начинает применять эти конденсаторы в своих разработках. Поэтому можно ожидать, что предлагаемая вниманию читателей книга поможет заполнить в некоторой степени пробел в этой области и окажется полезной в качестве исходной базы для проведения более углубленных исследований, касающихся сегнетоконденсаторов и их применения в технике.

Изготовление сегнетоконденсаторов еще ограничено пока небольшими масштабами; с одной стороны это объясняется тем, что свойства сегнетокерамики во многом еще нуждаются в дальнейшем улучшении, а с другой стороны — обусловлено, повидимому, сдержанным отношением конструкторов и инженеров, разрабатывающих электротехническую и радиотехническую

1*

аппаратуру, к новому типу конденсатора. Изложение основных свойств и особенностей сегнетоконденсаторов, надо полагать, будет способствовать более широкому их использованию в аппаратах и приборах, что в свою очередь будет стимулировать дальнейшее совершенствование сегнетоконденсаторов и расширение их производства. Тем самым ускорится развитие прогрессивных применений сегнетокерамики в народном хозяйстве.

Область сегнетокерамических материалов непрерывно пополняется новыми исследованиями и техническими новинками. К сожалению, ряд работ, появившихся в последнее время, не смог быть освещен в рукописи, подготовленной к печати в 1955 году; на многие из них сделаны дополнительные ссылки в списке литературы.

Автор выражает признательность В. Т. Ренне и Г. А. Смоленскому за ценные указания и советы, полученные от них при просмотре рукописи, а также своим сотрудникам и товарищам — за их систематическую помощь.

Замечания, касающиеся возможных недостатков книги, автор просит направлять в Ленгосэнергоиздат, Ленинград, Марсово поле, 1.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Нелинейные элементы электрической цепи отличаются от линейных тем, что их параметры не остаются постоянными при изменении тока или напряжения. Цепь, в которой имеются такие элементы, носит название нелинейной, так как процессы в этой цепи описываются нелинейными дифференциальными уравнениями. Нелинейными свойствами могут обладать активные, индуктивные и емкостные элементы цепей, а также элементы смешанного типа. Нелинейными емкостными элементами электрической цепи при определенных условиях являются конденсаторы, изготовленные из сегнетоэлектриков. Последние представляют собой класс веществ, которые обладают (при известных значениях температуры, частоты и напряженности электрического поля) необычными диэлектрическими свойствами. В сегнетоэлектриках зависимость мгновенного значения электрического смещения $D_{мгн}$ от напряженности поля $E_{мгн}$ при периодическом изменении последнего изображается кривой, подобной петле гистерезиса ферромагнитных материалов; аналогичную форму имеет зависимость заряда сегнетоконденсатора q от напряжения u на его зажимах (q и u—мгновенные значения). Это явление отставания изменений заряда конденсатора от изменений периодического напряжения носит название диэлектрического гистерезиса. Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика изменяется при изменении напряженности переменного поля; если диэлектрическую проницаемость сегнетоэлектрика измерять при слабом переменном поле, на которое накладывают постоянное поле, то наблюдается зависимость проницаемости от напряженности постоянного поля.

Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков изменяется при изменении температуры, зачастую очень резко; температурная зависимость имеет максимум.

Величина диэлектрической проницаемости при определенных температурах и напряженностях поля может быть большой, порядка тысяч и десятков тысяч. При изменении частоты максимум в температурной кривой диэлектрической проницаемости не смещается, он соответствует одной и той же температуре.

Диэлектрический гистерезис и зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности поля обнаруживают в неко-

торой области температур. Таким образом, существует граничная температура, при переходе через которую необычные свойства сегнетоэлектриков начинают исчезать. При этой температуре в сегнетоэлектрике совершаются структурные изменения, и ей соответствует так называемая точка Кюри или точка фазового перехода. В точке Кюри диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков в слабых полях достигает наибольшего значения. Заметим, что в сегнетовой соли наблюдаются две точки Кюри и указанные свойства наблюдаются в интервале температур между этими точками. Сегнетоэлектрики обладают при известных условиях также пьезоэлектрическими свойствами.

Следует указать, что отмеченные особенности сегнетоэлектриков не сохраняются при весьма высоких частотах; для керамических сегнетоэлектриков верхняя граница частот соответствует примерно 10^8 *гц*.

Перечисленные выше отличительные особенности сегнетоэлектриков предопределяют так называемые сегнетоэлектрические свойства этого класса веществ; надо, однако, иметь в виду, что эти особенности характеризуют сегнетоэлектрики далеко не исчерпывающим образом. Электрические свойства сегнетоэлектриков и их поведение в электрическом поле имеют внешнее сходство с отличительными чертами ферромагнитных материалов; поэтому в иностранной литературе сегнетоэлектрики иногда называют ферроэлектриками. Однако более правильным следует считать вошедшее у нас в обиход название сегнетоэлектрики, поскольку эти вещества не содержат железа. Между сегнетоэлектричеством и ферромагнетизмом имеется глубокое различие. Ферромагнитные свойства вещества связаны с собственным магнитным моментом электрона, который сохраняется и выше точки Кюри. Сегнетоэлектрические свойства связаны с электрическим моментом совокупности ионов, определенным образом расположенных в кристаллической решетке и образующих большой суммарный электрический момент в пределах определенной области. Выше некоторой температуры (точки Кюри) структура решетки приобретает иной характер и электрический момент исчезает. Наименование сегнетоэлектрика связано с названием вещества—сегнетова соль ($NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$),—у которого впервые были обнаружены указанные свойства. Сегнетова соль была открыта в 1672 г. и применялась в медицине. В 1880 г. братья П. и Ж. Кюри обнаружили в сегнетовой соли пьезоэлектрический эффект.

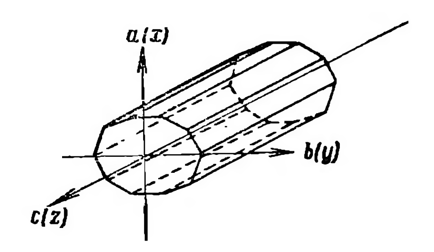
В 1894 г. были установлены аномалии диэлектрической проницаемости сегнетовой соли в направлении оси „$\vec{a}$“ кристалла. Из русских ученых, работавших по пьезоэлектричеству в это время, следует назвать Б. Коленко [Л. 2], Г. Вульфа и Н. Андреева. Сегнетовой соли начали уделять более серьезное внимание в результате работ И. Валашека и других (1915—1924), когда были установлены главные характеристики сегне-

товой соли: гистерезис, точки Кюри, необычайно высокая диэлектрическая проницаемость и др. Выдающуюся роль в детальном изучении и теоретическом истолковании аномалий сегнетоэлектриков сыграли работы советских ученых И. В. Курчатова, П. П. Кобеко с сотрудниками и Р. Шульвас—Сорокиной.

Сегнетова соль—двойная натрокалиевая соль винной кислоты; это кристалл ромбической системы (фиг. 1), который в сечении имеет форму десятиугольника; параметры решетки находятся между собой в следующем отношении:

$$a : b : c = 0{,}8317 : 1 : 0{,}4296.$$

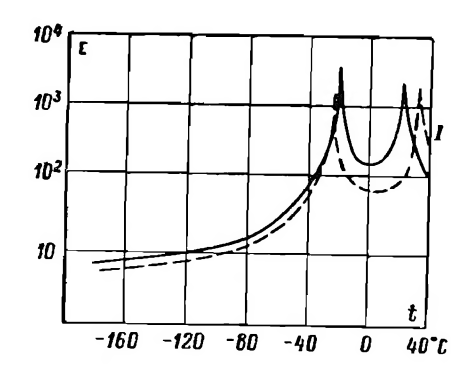
Удельный вес сегнетовой соли 1,767 *г/см*³; при нагревании кристалл легко трескается, а при температуре +50° С—разлагается. Сегнетова соль отличается хрупкостью; она легко растворяется в воде. Кристаллы сегнетовой соли резко анизотропны. Сегнетоэлектрическими свойствами кристалл обладает только вдоль кристаллографической оси *a*, которую называют сегнетоэлектрической осью. Только тогда, когда электрическое поле направлено вдоль этой оси или имеет составляющую, направленную по этой оси, наблюдается диэлектрический гистерезис, необычайно высокая диэлектрическая проницаемость и резкая зависимость диэлектрической проницаемости от температуры, градиента электрического поля и частоты. Свойства сегнетовой соли в направлениях осей *b* и *c* не отличаются заметно от свойств близких к ней кристаллических веществ.

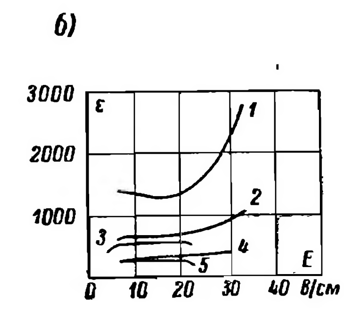


Фиг. 1. Кристалл сегнетовой соли; *a*, *b*, *c* — кристаллографические оси

Наиболее интересные для технических применений свойства сегнетовой соли наблюдаются при этом в слабых электрических полях, при невысоких частотах и в интервале температур от —18° до +22,5° С. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости, снятая при частоте 50 *гц* в слабых полях ($E < 60$ *в/см*) для свободного кристалла, имеет два максимума [Л. 3] (фиг. 2). Свойства сегнетовой соли заметно изменяются (фиг. 2) при замещении водорода в ее решетке на дейтерий (изотоп водорода с атомным весом, равным двум). Если температура значительно ниже —18° С или заметно выше +22,5° С, то высокая диэлектрическая проницаемость и свойства нелинейного диэлектрика еще обнаруживаются. Таким образом, для этого вещества сегнетоэлектрическая область простирается не в интер-

вале температур от $-18°$ до $+22{,}5°$ С, а занимает более широкую полосу. Зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности поля в слабых полях наблюдается лишь при частотах не более 5000 *гц* (фиг. 2, *б*). Диэлектрическая проницаемость при возрастании напряженности поля (частота 50 *гц*) в интервале значений



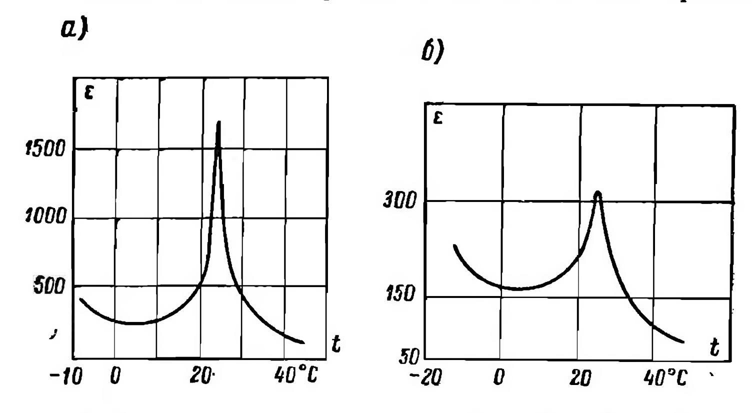


Фиг. 2. Зависимости диэлектрической проницаемости сегнетовой соли ($NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$) от температуры (*а*) и от напряженности поля (*б*)

Частота *f*, *гц*	10^3	$5 \cdot 10^3$	10^4	$5 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^5$
Кривые	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*

(кривая *1*—для дейтерозамещенной сегнетовой соли $NaKC_4H_2D_2O_6 \cdot 4H_2O$ при частоте 50 *гц* в слабом поле)

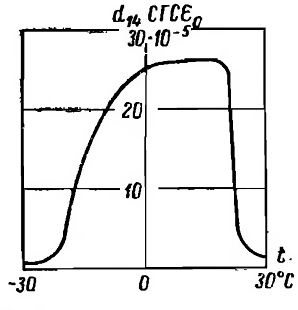
$E=100\ldots400$ *в/см* растет от $\varepsilon=1770$ до $\varepsilon=2330$, а затем падает, приобретая при $E=16{,}5$ *кв/см* значение $\varepsilon\approx200$. Заметим, что измерение диэлектрической проницаемости в сильных переменных



Фиг. 3. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости сегнетовой соли при частоте $8 \cdot 10^4$ *гц* в слабом поле ($E<60$ *в/см*): *а*—кристалл свободен; *б*—кристалл зажат

полях оказывается крайне затруднительным ввиду больших потерь в сегнетовой соли. Значение диэлектрической проницаемости при высоких частотах резко снижается (фиг. 3); при частотах

10^6—10^9 *гц* $\varepsilon \approx 100$; при частоте $9{,}5 \cdot 10^{10}$ *гц* $\varepsilon = 8$. Электрическая прочность сегнетовой соли при испытаниях на воздухе невысока. Пробой сегнетовой соли на воздухе происходит при напряженностях поля более низких, чем пробивные значения для воздуха, что объясняется появлением поверхностных разрядов. При неоднородном поле в трансформаторном масле (игла—плоскость) пробивная напряженность при толщине образца 3 *мм* не превосходит 30—50 *кв/см* при постоянном токе и 30—40 *кв/см* при переменном токе; при толщине 1 *мм* эти значения соответственно 90—100 и 60—70 *кв/см*. При более однородном поле (образец с лункой) пробой на постоянном токе в трансформаторном масле происходит при напряженности поля около 120 *кв/см* (при толщине около 1 *мм*). Потери в сегнетовой соли характеризуются значениями $\operatorname{tg}\delta = 0{,}7$ при напряженности поля $E = 105$ *в/см* и $\operatorname{tg}\delta = 0{,}1$ при $E = 16{,}5$ *кв/см*. Удельное объемное сопротивление сегнетовой соли при слегка повышенных температурах резко снижается и составляет при температуре $+43°$ C $\rho = 5 \cdot 10^{10}$ *ом·см*.



Фиг. 4. Температурная зависимость пьезоэлектрического модуля d_{14} при постоянном поле

Механическое сжатие кристалла сильно искажает форму кривой гистерезиса. Диэлектрическая проницаемость в слабых полях при этом резко падает (фиг. 3) и может оказаться равной нескольким единицам; пьезоэффект заметно выражен лишь в узком температурном интервале (фиг. 4). Пьезомодули при температуре $t = 20°$ C для сегнетовой соли (см. стр. 31) имеют следующие (средние) значения:

при постоянной нагрузке (статический режим)

$$d_{14} = 2{,}64 \cdot 10^{-4} \text{СГС}\varepsilon_0 = 8{,}8 \cdot 10^{-9} \text{ кулон/ньютон};$$

$$d_{25} = -5{,}63 \cdot 10^{-11} \; к/н,$$

$$d_{36} = 1{,}18 \cdot 10^{-11} \; к/н;$$

при знакопеременной нагрузке (динамический режим)

$$d_{14} = 2{,}7 \cdot 10^{-10} \; к/н,$$

$$d_{25} = -5{,}6 \cdot 10^{-11} \; к/н,$$

$$d_{36} = 1{,}17 \cdot 10^{-11} \; к/н.$$

При весьма высоких частотах, порядка 10^9 *гц*, диэлектрическая проницаемость сегнетовой соли становится небольшой, пьезодеформации не успевают возникать, вернее, следовать за изменениями поля. Поэтому диэлектрическая проницаемость

при высокой частоте близко соответствует величине, найденной для кристалла, не имеющего деформаций.

Одновременно с исследованиями сегнетовой соли И. Курчатовым, П. Кобеко и другими было установлено, что прибавление к сегнетовой соли изоморфных ей веществ, не обладающих сегнетоэлектрическими свойствами, позволяет изменять величину диэлектрической проницаемости и смещать точки Кюри в область более низких температур. Это наблюдалось при введении натрорубидиевой, таллиевой и натроаммонийной солей виннокаменной кислоты; несмотря на близость к сегнетовой соли этих соединений в отношении состава и кристаллической структуры, они не обладают сегнетоэлектрическими свойствами. Роль изоморфных примесей может быть различной. Натроаммонийная соль, например, вызывает уменьшение диэлектрической проницаемости и сужение сегнетоэлектрической области, причем верхняя точка Кюри смещается в область более низких температур; при значительных концентрациях аммонийной соли можно получить сегнетоэлектрик с одной верхней точкой Кюри. Указанные смеси обладали сегнетоэлектрическими свойствами в условиях преобладающего содержания сегнетовой соли [Л. 5].

В сороковых годах нашего столетия появились данные о других сегнетоэлектриках, имеющих в отличие от сегнетовой соли одну точку Кюри. К таким соединениям принадлежит фосфорнокислый калий KH_2PO_4; для этого сегнетоэлектрика точка Кюри имеет место при весьма низкой температуре $-158°$ C и значение ε вдоль оси c составляет при этой температуре 47 500; при нормальной температуре $\varepsilon < 100$. При замене водорода на дейтерий получают кристаллы (KD_2PO_4) с точкой Кюри при $t = -68°$ C.

Другим веществом с сегнетоэлектрическими свойствами является соединение KH_2AsO_4—мышьяковокислый калий—с точкой Кюри при $t = -182°$ C; значение ε вдоль оси c при этой температуре равно 36 500; при нормальной температуре диэлектрическая проницаемость у всех этих веществ мала и они сегнетоэлектрическими свойствами не обладают.

Анализ рассмотренных основных свойств сегнетовой соли позволяет сделать вывод о наличии ряда недостатков, препятствующих ее техническому использованию. К ним относится в первую очередь то, что высокая диэлектрическая проницаемость и значительные нелинейные свойства сегнетовой соли сохраняются в очень узком интервале температур; в других сегнетоэлектриках того же типа, открытых позднее, эти свойства наблюдаются лишь при весьма низких температурах: $t = -158°$ C для KH_2PO_4 и $t = -182°$ C для KH_2AsO_4. Далее, исключается возможность использования сегнетовой соли при частотах свыше 5 *кгц*, так как исчезает зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности поля.

Направление поля в кристалле сегнетовой соли должно совпадать с сегнетоэлектрической осью (ось *a*); только в этом случае наблюдаются указанные выше свойства. Использование сегнетовой соли затруднено также в связи с ее весьма низкой электрической прочностью и неблагоприятными химико-физическими свойствами (хрупкость, химическая нестабильность, способность растворяться в воде, способность трескаться при нагреве, разлагаться при невысокой температуре, около 50° С и др.). От этих недостатков в значительной мере свободны керамические сегнетоэлектрики. Отличие процесса поляризации под воздействием внешнего поля в сегнетокерамике по сравнению с линейной керамикой заключается в том, что поляризация представляет собой не только смещение зарядов; происходит рост одних спонтанно поляризованных областей за счет сокращения других и ориентация целых областей в электрическом поле; возможно также зарождение и рост новых областей. Сегнетокерамика сохраняет сегнетоэлектрические свойства в широком интервале температур и частот (10^7—10^8 *гц*); будучи по своему строению поликристаллами, керамические сегнетоэлектрики обнаруживают сегнетоэлектрические свойства при всех направлениях электрического поля, а не только при направлении поля вдоль одной оси, как в случае сегнетовой соли. Сегнетокерамика после воздействия электрического поля приобретает пьезоэлектрические свойства. Электрическая прочность керамических сегнетоэлектриков при испытаниях на воздухе в 2 . . . 4 раза выше, чем прочность сегнетовой соли. Наконец, существенную роль играет также и то, что сегнетокерамика в отличие от сегнетовой соли обладает достаточно высокой механической прочностью, химической стабильностью, влагостойкостью и нагревостойкостью. Производство керамики не требует дефицитного сырья, отличается сравнительно несложной технологией, позволяет выполнять изделия различной конфигурации, допускает механизацию основных производственных процессов; в небольших масштабах изготовление сегнетокерамики может быть налажено в лаборатории завода, института или конструкторского бюро.

В период Великой Отечественной войны Физический институт АН СССР выполнял ряд исследований, связанных с разработками новых керамических конденсаторов различных типов. В ходе этих исследований Б. М. Вулом и его сотрудниками был синтезирован новый вид керамики — титанат бария, обладающий свойствами сегнетоэлектрика. Результаты исследований различных свойств титаната бария и первые теоретические соображения по этому вопросу были опубликованы в СССР в 1945 г. Эти работы касались свойств титанатов металлов второй группы периодической системы элементов; к ним относится и титанат бария [Л. 6]; было обнаружено влияние

напряженности поля и давления на диэлектрическую проницаемость [Л. 7] и др.

Упомянутые работы охватывают основные данные и физические представления, свидетельствующие о принадлежности титаната бария к сегнетоэлектрикам [Л. 9]. Тогда же была развита и теория сегнетоэлектриков (термодинамическая), в которой фазовый переход в сегнетоэлектриках рассматривается как фазовый переход второго рода или переход первого рода, близкий к критической точке Кюри [Л. 10].

За рубежом в технической печати сообщалось в 1944 г. о материалах с диэлектрической проницаемостью, превышающей тысячу, без указания состава этих материалов; первые же сведения о керамических сегнетоэлектриках, о их составе и строении были опубликованы в 1946 г. [Л. 11]; в этой статье отмечается, что исследования сегнетокерамики велись во время войны и первые результаты были получены в 1943 г., но в печати появились в 1946 г. Таким образом, не подлежит сомнению, что открытие керамических сегнетоэлектриков и создание основных положений их теории было сделано учеными нашей страны самостоятельно и совершенно независимо от работ, проводившихся за рубежом. Выдающееся значение исследований советских авторов в области сегнетокерамики получило широкое признание; в ряде обзоров отдается должное фундаментальным открытиям и исследованиям, сделанным в Советском Союзе [Л. 12].

Нелинейные керамические материалы за прошедшие годы получили значительное развитие. Вскоре после открытия титаната бария серьезное внимание привлекли к себе изоморфные смеси $BaTiO_3$ с другими кристаллическими соединениями. Еще в начале развития сегнетоэлектриков были исследованы смеси сегнетовой соли с изоморфными ей веществами, причем было установлено наличие сегнетоэлектрических свойств у этих смесей в случае преобладания в составе сегнетовой соли. Аналогичное свойство у керамических сегнетоэлектриков было впервые обнаружено в Физическом институте АН СССР А. К. Ишхнели [Л. 13]. Системы на основе $BaTiO_3$ могут состоять из твердых растворов и смесей кристаллических фаз. Существенный интерес представляет образование непрерывных рядов твердых растворов, которое возможно в том случае, если спекаемые вещества имеют один и тот же тип кристаллической решетки, а радиусы ионов мало отличаются друг от друга; вещества, образующие твердые растворы, должны иметь одинаковую природу связи. Изучение электрических свойств сегнетоэлектрической керамики, содержащей титанат бария с добавками, показало, что использование некоторых компонентов приводит к перемещению точки Кюри в область более низких температур и к снижению максимального значения ε; это сопровождается ослаблением градиентной зависимости ε и явления ги-

стерезиса. Имеются, однако, компоненты, которые позволяют получить диэлектрическую проницаемость при известных значениях температуры и градиента поля выше, чем у титаната бария, равно как и более резкую зависимость ε от напряженности поля. Вслед за этим было установлено, что помимо $BaTiO_3$ сегнетоэлектрическими свойствами обладает ряд других поликристаллов. Новые сегнетоэлектрики со структурой решетки типа перовскита (как и у титаната бария)—титанат свинца, титанат кадмия, цирконат свинца и титанат стронция—были открыты Г. А. Смоленским с сотрудниками; ими же были обнаружены сегнетоэлектрические свойства у танталата свинца—вещества с более сложной структурой. Замечательно, что многие из новых керамических сегнетоэлектриков не содержат ионов бария или титана или и тех и других. Хотя благоприятной структурой для появления сегнетоэлектрических свойств является структура типа перовскита, в настоящее время известен ряд сегнетоэлектриков, кристаллизующихся не только в структуре типа перовскита, но и в структурах ильменита, трехокиси рения и пирохлора, а также, повидимому, в более сложных [Л. 14].

А. В. Ржановым были открыты пьезоэлектрические свойства титаната бария [Л. 15]. Свойства соединений титана и бария как близких по составу к титанату бария, так и сильно отличающихся от него, были детально изучены Г. И. Сканави [Л. 16]. Керамическим сегнетоэлектрикам посвящен ряд других фундаментальных работ советских авторов. Плодотворно разрабатывали теорию сегнетоэлектрических явлений В. Л. Гинзбург, Г. А. Смоленский с сотрудниками и другие [Л. 17—22]. Проведенные работы позволили не только изучить ход основных закономерностей в титанате бария и ряде других видов керамики, но и построить в значительной мере общую картину явлений, протекающих в сегнетокерамике, а также главные элементы теории сегнетоэлектриков. Сравнительно недавно были открыты кристаллы, в которых, так же как и в сегнетоэлектриках, происходит самопроизвольное смещение ионов, однако таким образом, что результирующая спонтанная поляризация оказывается равной нулю; эти вещества были названы антисегнетоэлектриками. Одновременно были предприняты исследования по техническому применению керамических сегнетоэлектриков в конденсаторах [Л. 23, 24], в деталях и в различных видах аппаратуры. Здесь решающее значение получили работы, выполненные В. П. Вологдиным [Л. 25], Г. И. Сканави [Л. 26], Н. П. Богородицким [Л. 27] и их сотрудниками, а также и рядом других авторов.

Таким образом, параллельно развиваются сегнетокерамика и ее технические применения. Несмотря на короткий исторический путь, пройденный сегнетокерамикой, уже очевидно, что среди диэлектриков она в скором времени займет такое же

видное место, какое занимают ферромагнитные материалы среди магнитных веществ. Кроме того, сегнетокерамика может служить для получения пьезоэлектрических элементов, датчиков температуры и др.

В настоящее время представляется возможным указать три основных направления использования сегнетокерамики:

а) конденсаторы с высокой электрической емкостью в единице объема, в рабочих условиях обладающие обычно слабыми нелинейными свойствами;

б) конденсаторы с высокой нелинейностью в рабочих условиях; такие конденсаторы получили название нелинейных конденсаторов или варикондов;

в) пьезоэлектрические преобразователи.

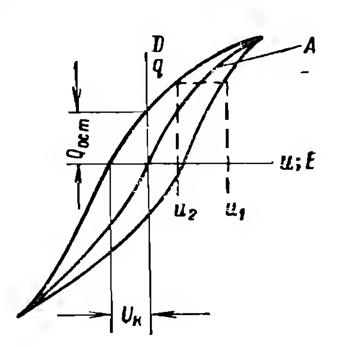
Наряду с сегнетокерамическими материалами — поликристаллическими сегнетоэлектриками—получают применение монокристаллы—сегнетоэлектрики. Они используются для запоминающих элементов вычислительных машин, для нелинейных элементов диэлектрических усилителей и для решения других важных задач.

Глава первая

ОБЩИЕ СВОЙСТВА СЕГНЕТОКОНДЕНСАТОРОВ

1. Диэлектрический гистерезис

Если приложить к сегнетоконденсатору достаточно высокое переменное напряжение, то кривая заряда *q* при возрастании напряжения *u* не совпадает с аналогичной кривой при уменьшении напряжения. Это явление отставания изменений заряда конденсатора от периодически совершающихся изменений напряжения, сопровождающееся насыщением сегнетоэлектрика, получило название диэлектрического гистерезиса; кривая диэлектрического гистерезиса напоминает по форме петлю магнитного гистерезиса (фиг. 5). Таким образом, заряд конденсатора может иметь два значения при одном и том же напряжении, в зависимости от того, происходит ли нарастание напряжения или убывание его в пределах периода. Диаграмма гистерезиса становится кривой, симметричной относительно начала координат и воспроизводимой через каждый период изменения напряжения лишь через некоторое время после включения конденсатора под напряжение; только после значительного числа циклов появляется кривая гистерезиса, совпадающая с предшествующей и симметричная относительно начала координат; такую кривую сокращенно именуют симметричной.



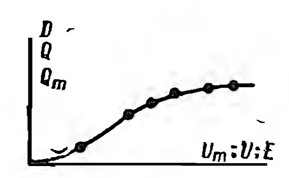
Фиг. 5. Кривая диэлектрического гистерезиса с построенной средней идеальной кривой *A*

При одном и том же приложенном напряжении форма кривой гистерезиса зависит также от предшествующего состояния (степени поляризации) диэлектрика. Предварительное воздействие сильного поля вызывает изменение формы кривой [Л. 28].

Когда напряжение убывает и переходит через нуль, сохраняется некоторая поляризованность диэлектрика и остаточный

заряд $Q_{ост}$ (фиг. 5). Этот заряд при увеличении обратного напряжения убывает и становится равным нулю лишь при некотором напряжении $U_к$, которое называют коэрцитивным напряжением. В этом отношении также наблюдается аналогия с магнитными материалами. Заметим, однако, что если в момент, когда напряжение равно нулю, выключить цепь, то конденсатор не сможет сохранить остаточный заряд Q вследствие наличия у сегнетоэлектрика электропроводности и оседания зарядов из воздуха. Это одно из обстоятельств, которые коренным образом отличают сегнетоэлектрики от магнитных материалов. Во многих случаях при ориентировочных расчетах можно пренебречь неоднозначностью гистерезисной зависимости; при этом используют так называемую идеальную кривую гистерезиса, представляющую зависимость мгновенного значения заряда от усредненного мгновенного значения периодически меняющегося напряжения (фиг. 5). Для любого значения q этой кривой величина напряжения u определяется, как среднее между u_1 и u_2, соответствующими значениям q на восходящей и нисходящей ветвях гистерезисной кривой

$$u = \frac{u_1 + u_2}{2}.$$



Фиг. 6. Основная кулонвольтная кривая, построенная по кривым диэлектрического гистерезиса фиг. 23, *б*

Если снимают симметричные диаграммы гистерезиса для предварительно деполяризованного образца при возрастающих значениях амплитуды напряжения, то получают ряд кривых [Л. 28], охватывающих все большие площади; соединив вершины этих симметричных гистерезисных кривых, получают так называемую основную кулонвольтную кривую сегнетоконденсатора; на графике по оси ординат отложены максимальные значения заряда, по оси абсцисс—максимальные значения напряжения (фиг. 6).

Электрическая индукция (смещение) пропорциональна в плоском конденсаторе величине заряда

$$D_{мгн} = \frac{1}{S_э} q, \tag{1}$$

где $S_э$—площадь электрода конденсатора.

Напряженность поля $E_{мгн}$ пропорциональна напряжению

$$E_{мгн} = \frac{1}{h} u, \tag{2}$$

где h—толщина диэлектрика.

Поэтому кривая гистерезиса изображает в других масштабах зависимость электрической индукции от напряженности

поля. В связи с этим, рассматривая в соответствующих масштабах кривую диэлектрического гистерезиса, как зависимость электрической индукции от напряженности поля, вводят понятия остаточной индукции $D_{ост}$ и коэрцитивной напряженности поля $E_к$. Величина остаточной индукции $D_{ост}$ соответствует мгновенному значению $E_{мгн}=0$, а значение напряженности, при которой кривая $D(E)$, убывая, переходит через нуль, представляет собой $E_к$.

В ряде случаев можно ввести допущения, существенно упрощающие проведение технических расчетов при помощи кулонвольтной кривой. Если полагать синусоидальными напряжение и заряд на конденсаторе, то можно представить кулонвольтную кривую, как зависимость между действующими значениями заряда Q (индукции D) и напряжения U (напряженности E). К основной кулонвольтной кривой близка начальная кулонвольтная кривая, которая представляет собой зависимость заряда $Q_=$ конденсатора от постоянного напряжения $U_=$. Начальную кулонвольтную кривую можно получить, подводя к сегнетоконденсатору напряжения $U_=$, возрастающие ступенями, и измеряя каждый раз заряд Q на электродах конденсатора. Так как величина заряда зависит от предшествующего состояния (степени поляризации) диэлектрика и длительности поляризации, то необходимо, чтобы конденсатор был предварительно полностью разряжен, и чтобы напряжение изменялось только в сторону увеличения, каждый раз при достаточной выдержке.

Диаграмма диэлектрического гистерезиса (симметричная кривая) предварительно деполяризованного конденсатора позволяет определить ряд его важных параметров, рассматриваемых ниже.

2. Электрическая емкость

Емкость конденсатора представляет собой заряд, находящийся на одном из электродов, отнесенный к единице напряжения, приложенного к конденсатору

$$C = \frac{q}{u}. \tag{3}$$

Емкость конденсатора всегда пропорциональна диэлектрической проницаемости изолирующего материала, используемого в качестве диэлектрика в конденсаторе

$$C = A\varepsilon, \tag{4}$$

где коэффициент A является функцией геометрических величин, характеризующих форму и размеры конденсатора.

При использовании линейных диэлектриков емкость конденсатора остается величиной, неизменной при различных

напряжениях, не выходящих за пределы допустимых; пропорциональность между зарядом и напряжением всегда сохраняется. С известным приближением это имеет место и в сегнетоконденсаторах в случае слабых электрических полей. В сильных полях пропорциональность между напряжением и зарядом сегнетоконденсатора не сохраняется, и поэтому емкость, вообще говоря, зависит от приложенного напряжения. Увеличение или уменьшение емкости при изменении напряжения вызывается изменением диэлектрической проницаемости. Последняя связана с электрическим смещением (индукцией) D и напряженностью поля в диэлектрике E следующим образом

$$D=\varepsilon\varepsilon_0 E, \tag{5}$$

где ε_0—электрическая постоянная (Л. 32).

В системе МКСА

$$\varepsilon_0=8{,}85\cdot 10^{-12}\ ф/м.$$

Индукцию D в однородном и изотропном диэлектрике можно представить в виде двух слагаемых

$$D=D_0+P, \tag{6}$$

где D_0—индукция в вакууме, P—поляризованность.

Поляризованность P с количественной стороны характеризует процесс поляризации диэлектрика под воздействием электрического поля и равна суммарному электрическому моменту, отнесенному к единице объема диэлектрика

$$P=\frac{\Sigma m}{V}. \tag{7}$$

Поскольку электрический (дипольный) момент есть вектор, то и поляризованность P есть векторная величина, так же как и индукция D. В изотропном диэлектрике векторы $\bar{D}$, $\bar{D}_0$ и $\bar{P}$ совпадают по направлению. В линейном диэлектрике поляризованность растет пропорционально напряженности поля

$$P=\alpha E, \tag{8}$$

где α—диэлектрическая восприимчивость.

Подставив выражения для P и D в формулу (6), получим, сократив на E

$$\varepsilon\varepsilon_0=\varepsilon_0+\alpha; \tag{9}$$

относительная диэлектрическая проницаемость

$$\varepsilon=1+\frac{\alpha}{\varepsilon_0}. \tag{10}$$

В слабых полях поляризованность сегнетокерамики возрастает почти пропорционально напряженности E; в относительно сильных полях поляризованность P изменяется непропорционально изменениям напряженности E. Физически это обусловлено тем, что поляризованность сегнетокерамики состоит из двух составляющих: индуцированной поляризованности $P_{инд}$, пропорциональной напряженности поля, и спонтанной поляризованности $P_{сп}$, которая изменяется в зависимости от напряженности E не по линейному закону. Таким образом, для сегнетокерамики в том интервале температур, в котором проявляются ее свойства нелинейного диэлектрика, электрическое смещение

$$D = D_0 + P_{инд} + P_{сп}; \tag{11}$$

при этом величина $P_{сп}$ весьма велика по сравнению с $P_{инд}$.

Емкость сегнетоконденсатора согласно сказанному может быть выражена следующим образом

$$C = A\varepsilon = A\left(1 + \frac{P_{инд}}{\varepsilon_0 E} + \frac{P_{сп}}{\varepsilon_0 E}\right). \tag{12}$$

Поскольку $P_{сп}$ изменяется непропорционально E, емкость сегнетоконденсатора C при относительно сильных полях изменяется при изменении напряженности E; само понятие емкости сегнетоконденсатора может быть различным в зависимости от условий работы конденсатора в электрической цепи. Остановимся на некоторых понятиях емкости, получивших наибольшее распространение.

Нормальная или статическая емкость сегнетоконденсатора — емкость при постоянном токе

$$C_= = \frac{Q_=}{U_=}, \tag{13}$$

где

U — напряжение постоянного тока, приложенное к конденсатору;

Q — заряд на одном из электродов, установившийся по окончании зарядки конденсатора.

Заряд измеряют обычно баллистическим гальванометром. Статическая емкость сегнетоконденсатора является функцией напряжения, а также температуры. Величина $C_=$ является важнейшей характеристикой сегнетоконденсатора, используемого в цепях постоянного тока.

Эффективная емкость сегнетоконденсатора — емкость при переменном токе.

В случае линейного конденсатора заряд на обкладках (если пренебречь потерями) при переменном напряжении изменяется

2*

пропорционально мгновенному значению напряжения; в случае сегнетоконденсатора линейная зависимость между зарядом q и напряжением u исчезает, и для разных моментов времени отношение мгновенных значений $\frac{q}{u}$ будет иметь различную величину. При переменном токе для сегнетоконденсаторов удобно ввести понятие эффективной емкости, т. е. емкости такого линейного конденсатора, заряд которого Q_m при максимальном значении напряжения U_m равен заряду нелинейного конденсатора при том же напряжении

$$C_э = \frac{Q_m}{U_m}. \tag{14}$$

Для указанного линейного конденсатора, которым заменяют данный нелинейный конденсатор, емкость, равная отношению мгновенных значений заряда и напряжения,

$$C_э = \frac{Q_m}{U_m} = \frac{q}{u}, \tag{15}$$

может быть выражена при помощи комплексных величин и вычислена по действующим значениям напряжения и емкостного тока.

При синусоидальной форме кривых заряд

$$q = \int_0^t i(t)\,dt \tag{16}$$

изображается комплексной величиной

$$\frac{\dot{I}_m}{j\omega} e^{j\omega t}, \tag{17}$$

и напряжение u—комплексной величиной

$$\dot{U}_m e^{j\omega t}. \tag{18}$$

Следовательно, эффективная емкость

$$C_э = \frac{\dot{I}_m e^{j\omega t}}{j\omega} : \dot{U}_m e^{j\omega t} = -j\frac{\dot{I}}{\omega \dot{U}}. \tag{19}$$

Таким образом, эффективная емкость определяет собой ток I конденсатора без потерь при напряжении U и частоте $\omega = 2\pi f$.

Поскольку основная кулонвольтная кривая представляет зависимость $Q_m(U_m)$, то эффективная емкость в любой точке этой кривой пропорциональна с учетом масштабов заряда m_q

и напряжения m_u тангенсу угла α наклона к оси абсцисс секущей, проведенной из начала координат через эту точку

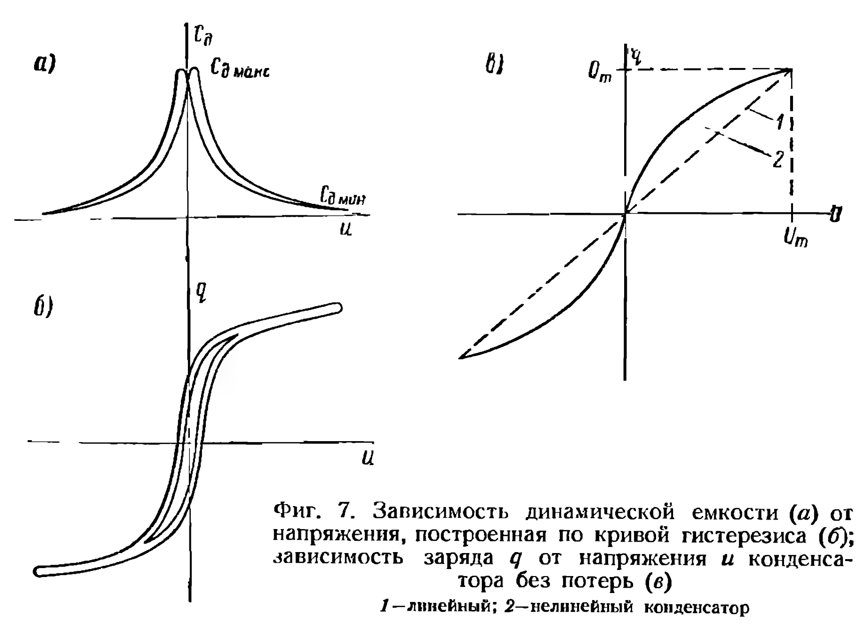
$$C_э = \frac{Q_m}{U_m} - \frac{m_q}{m_u} \operatorname{tg} \alpha. \qquad (20)$$

Эффективная емкость является одной из важных характеристик сегнетоконденсатора, используемого в цепях переменного тока.

Дифференциальная (динамическая) емкость сегнетоконденсатора определяется выражением

$$C_д = \frac{\partial q}{\partial u}. \qquad (21)$$

Дифференциальная емкость пропорциональна тангенсу угла между касательной и кривой $q(u)$ и осью абсцисс; очевидно,



Фиг. 7. Зависимость динамической емкости (*а*) от напряжения, построенная по кривой гистерезиса (*б*); зависимость заряда q от напряжения u конденсатора без потерь (*в*)

1—линейный; *2*—нелинейный конденсатор

она является изменяющейся величиной в пределах периода колебаний переменного тока и максимальное значение приобретает в момент, когда кривая гистерезиса пересекает ось абсцисс (фиг. 7). Для линейных конденсаторов (без потерь) нормальная, эффективная и дифференциальная емкости совпадают между собой благодаря линейной зависимости, существующей между зарядом и напряжением.

Реверсивная емкость C_p сегнетоконденсатора представляет эффективную емкость в условиях, когда на перемен-

ное поле с небольшой амплитудой напряжения U_m наложено постоянное поле $(U_=)$

$$C_p = \left(\frac{Q_m}{U_m}\right)_{U_=}. \tag{22}$$

Реверсивная емкость является одной из основных характеристик сегнетоконденсатора, если к нему прикладывается постоянное напряжение, содержащее переменную составляющую. Заметим, что могут быть введены и другие дополнительные понятия емкости.

Номинальной емкостью сегнетоконденсатора считают его эффективную емкость при номинальном синусоидальном напряжении и нормальных условиях (температура $t = (20 \pm 5)°$ C, относительная влажность воздуха $\varphi = (65 \pm 5)\%$, давление воздуха h (750 ± 30) *мм*.

Одной из характеристик конденсатора является емкость, отнесенная к единице объема; эта величина именуется удельной емкостью

$$C_{уд} = \frac{C}{V}. \tag{23}$$

Для нелинейного конденсатора в большинстве случаев рассматривают удельную эффективную емкость.

3. Нелинейность конденсатора

Изменение параметров конденсатора при изменении приложенного напряжения характеризуют при помощи так называемой нелинейности сегнетоконденсатора. В зависимости от условий работы сегнетоконденсатора его нелинейные свойства проявляются по-разному.

Остановимся на некоторых понятиях нелинейности. Следует тут же заметить, что каждое из этих понятий позволяет охарактеризовать нелинейные свойства только односторонне, в соответствии с характером рассматриваемого поля и его изменения.

Эффективная нелинейность представляет относительное приращение эффективной емкости, деленное на приращение напряжения (действующее значение). Эффективная нелинейность выражается следующим образом:

$$N_э = \frac{1}{C_э}\frac{dC_э}{dU}. \tag{24}$$

При изменении приложенного напряжения (действующего значения) ток сегнетоконденсатора изменяется непропорционально изменению напряжения. Емкостная составляющая тока сегнетоконденсатора выражается произведением $U\omega C_э$. Если напряжение увеличится на ΔU, то емкость также изменится и

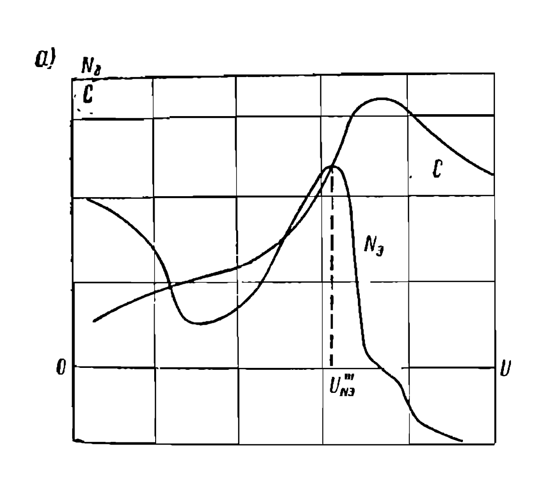
составит $C_э + \Delta C_э$. Изменение тока, если пренебречь высшими гармониками,

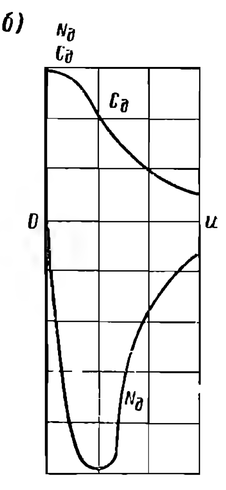
$$(U + \Delta U)\,\omega\,(C_э + \Delta C_э) - U\omega C_э = \omega C_э\,\Delta U + U\omega\,\Delta C_э.$$

Второе слагаемое представляет величину, характеризующую отклонение тока от прямолинейной зависимости $I(U)$, справедливой для линейного конденсатора; разделив эту величину на ток и на приращение напряжения, получим эффективную нелинейность

$$\frac{U\omega\,\Delta C_э}{U\omega C_э\,\Delta U} = \frac{\Delta C_э}{C_э\,\Delta U}.$$

Таким образом, эффективная нелинейность характеризует дополнительное изменение тока сверх изменения, отвечающего линейной зависимости $I(U)$, отнесенное к единице действующего значения емкостного тока сегнетоконденсатора и приращения напряжения ΔU. Эффективная нелинейность может быть найдена по зависимости эффективной емкости от напряжения. Наибольшее значение эффективной нелинейности имеет место в районе максимальной крутизны наклона кривой $C_э(U)$ (фиг. 8, *а*).





Фиг. 8.
а—Зависимости эффективной емкости и эффективной нелинейности от напряжения для конденсатора из тибара τ5: $t = 18°$ С, $f = 50$ *гц*; *б*—зависимости дифференциальной емкости $C_д$ и дифференциальной нелинейности от напряжения. Диэлектрик—твердый раствор титаната бария и титаната стронция

Эффективная нелинейность является одной из основных характеристик нелинейного конденсатора, используемого в сег-

нетоэлектрических стабилизаторах напряжения, в нелинейных мостах и в ряде аналогичных устройств.

Дифференциальная (динамическая) нелинейность представляет относительное приращение динамической емкости конденсатора, деленное на соответствующее приращение мгновенного значения напряжения. Выражение для дифференциальной нелинейности имеет вид

$$N_{\partial}=\frac{1}{C_{\partial}}\frac{dC_{\partial}}{du}. \qquad (25)$$

Мгновенное значение тока, если использовать выражение для дифференциальной емкости,

$$i=\frac{dq}{d\tau}=\frac{dq}{du}\frac{du}{d\tau}=C_{\partial}\frac{du}{d\tau}. \qquad (26)$$

Для линейного конденсатора дифференциальная емкость совпадает со статической емкостью и имеет постоянную величину; для нелинейного конденсатора дифференциальная емкость непостоянна, и при увеличении напряжения на Δu появляется дополнительное изменение тока, обусловленное величиной приращения ΔC_{∂} и равное $\Delta C_{\partial}\frac{du}{d\tau}$. Разделив эту величину на ток и на приращение напряжения, получим дифференциальную нелинейность.

Таким образом, дифференциальная нелинейность характеризует дополнительное изменение тока сверх изменения, отвечающего линейной зависимости $i(u)$, отнесенное к единице мгновенного значения тока сегнетоконденсатора и приращения напряжения. Иными словами, дифференциальная нелинейность выражает степень отклонения тока, как функции времени $i(\tau)$ от синусоидальной кривой, когда приложенное напряжение синусоидально. Дифференциальная емкость C_{∂} уменьшается с ростом напряжения u, а зависимость дифференциальной нелинейности от напряжения, построенная для идеальной кривой гистерезиса, переходит через отрицательный максимум (фиг. 8, *б*). Положение максимума N_{∂} находится в районе максимальной крутизны наклона кривой дифференциальной емкости.

Зависимость дифференциальной емкости от мгновенных значений напряжения существенно важна в случае использования нелинейного конденсатора в сегнетоэлектрических умножителях частоты, усилителях, генераторах импульсов и в других подобных устройствах.

Реверсивная нелинейность представляет относительное приращение реверсивной емкости конденсатора, деленное на соответствующее приращение постоянного напряжения

$$N_{p}=\frac{1}{C_{p}}\frac{dC_{p}}{dU_{-}}. \qquad (27)$$

С помощью реверсивной нелинейности определяют степень влияния изменений постоянного (смещающего) поля на величину реверсивной емкости. Зависимость реверсивной нелинейности напряженности постоянного поля по своему характеру напоминает кривую $N_д(u)$ (фиг. 8, *б*).

Реверсивная нелинейность представляет одну из характеристик сегнетоконденсатора, используемого в сегнетоэлектрических усилителях.

Нелинейность насыщения представляет максимальную дифференциальную емкость сегнетоконденсатора, деленную на минимальную дифференциальную емкость и на амплитуду напряжения. Нелинейность насыщения выражается следующей формулой:

$$N_н = \frac{1}{U_m} \frac{C_{д.\,макс}}{C_{д.\,мин}}. \qquad (28)$$

С помощью нелинейности насыщения определяется наибольший размах изменений дифференциальной емкости за половину периода на единицу амплитуды напряжения. Нелинейность сегнетоконденсатора измеряется во всех случаях в 1/вольт; это видно из структуры формул 24, 25, 27 и 28. Помимо рассмотренных способов оценки нелинейности сегнетоконденсатора могут иметь место и другие. Так, например, получил распространение условный способ оценки нелинейности с помощью отношения значений эффективной емкости C_I и C_{II}, измеренных при двух различных напряжениях переменного тока U_I и U_{II} $(U_{II} > U_I)$; это отношение можно назвать емкостной нелинейностью $N_{емк}$; она измеряется в процентах:

$$N_{емк} = \frac{C_{II}}{C_I} 100. \qquad (29)$$

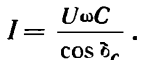
4. Реактивная мощность и добротность конденсатора

Линейный конденсатор, включенный в цепь с синусоидальным напряжением, не вызывает искажения формы кривой тока; ток в цепи является синусоидальным. В этом случае, т. е. при синусоидальной форме кривых тока и напряжения основные соотношения изображают при помощи векторных диаграмм, которые строят применительно к той или иной эквивалентной схеме конденсатора. Используя параллельную эквивалентную схему и откладывая по оси вещественных вектор напряжения U, ток линейного конденсатора представляют в виде двух составляющих. Вектор активного тока $\overline{I}_a$ совпадает с напряжением, вектор реактивного тока $\overline{I}_p$ опережает напряжение на 90° (фиг. 9). Угол, дополняющий сдвиг фаз между

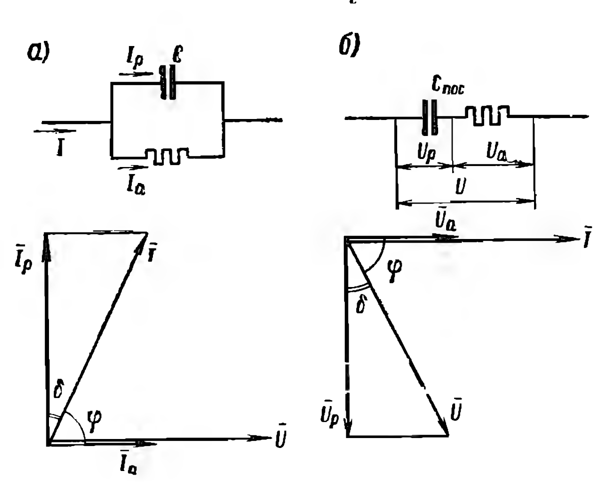
током и напряжением $\delta_c = \frac{\pi}{2} - \varphi$, представляет собой угол потерь δ_c в конденсаторе. Среднюю мощность (активную) в цепи переменного тока

$$P_a = UI \cos \varphi$$

для конденсатора выражают иначе. Из векторной диаграммы находят ток I:



$$I = \frac{U\omega C}{\cos \delta_c}.$$



Фиг. 9. Параллельная (*а*) и последовательная (*б*) эквивалентные схемы линейного конденсатора и соответствующие им векторные диаграммы токов и напряжений

Приняв во внимание, что $\cos \varphi = \sin \delta_c$, преобразуют выражение для активной мощности и получают

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta_c. \qquad (30)$$

Это выражение определяет собой активную мощность, т. е. потери в конденсаторе. Реактивная мощность в цепи переменного тока

$$P_p = UI \sin \varphi \qquad (31)$$

может быть выражена следующим образом, если воспользоваться выражением для тока и учесть, что $\sin \varphi = \cos \delta_c$:

$$P_p = U^2 \omega C. \qquad (32)$$

Полная (кажущаяся) мощность конденсатора

$$S = UI = \sqrt{P_a^2 + P_p^2}. \qquad (33)$$

Можно получить и другие выражения для полной мощности. Согласно (30) и (32)

$$S=P_\rho\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta_c}\,.$$

С приближением

$$S=P_\rho\left(1+\frac{1}{2}\operatorname{tg}^2\delta_c\right). \tag{34}$$

При $\operatorname{tg}\delta \leqslant 0{,}3$ погрешность этой формулы не превосходит 0,1%.

Потери в конденсаторе складываются из потерь в диэлектрике и из потерь в электродах; к этим потерям могут прибавиться потери от ионизации на краях электродов и др. Для технических конденсаторов тангенс угла потерь невелик и с достаточной точностью можно считать

$$\operatorname{tg}\delta_c \approx \delta_c; \tag{35}$$

погрешность этой формулы не превышает 1%, если

$$\delta_c \leqslant 9{,}8^\circ \quad \text{или} \quad \operatorname{tg}\delta_c \leqslant 0{,}172.$$

Следовательно, кажущаяся мощность

$$S \approx P_\rho\left(1+\frac{1}{2}\delta_c^2\right). \tag{36}$$

Зачастую вместо тангенса угла потерь используют величину обратную—добротность конденсатора

$$Q_c=\frac{1}{\operatorname{tg}\delta_c}\approx\frac{1}{\delta_c}. \tag{37}$$

В случае сегнетоконденсаторов, работающих в слабых полях, формы кривых тока и напряжения мало отличаются от синусоиды и поэтому понятие угла потерь может быть использовано. При относительно сильных полях кривая тока в цепи имеет сложную форму; для несинусоидальных величин векторные диаграммы не могут применяться и само понятие угла потерь становится условным.

Потери в нелинейном конденсаторе могут быть найдены по диаграмме диэлектрического гистерезиса. Если при напряжении u заряд сегнетоконденсатора возрастет на dq, то работа, затрачиваемая внешним источником, составит

$$dA_\partial = u\,dq. \tag{38}$$

При перезарядке конденсатора энергия, теряемая вследствие явления гистерезиса за один полный симметричный цикл, выражается интегралом

$$A_\partial = \oint u\,dq. \tag{39}$$

Как известно, этот интеграл пропорционален площади петли гистерезиса $S_г$.

$$A_д = \oint u\,dq = m_u m_q S_г, \qquad (40)$$

где m_u и m_q—масштабы напряжения (по оси абсцисс) и заряда (по оси ординат) для диаграммы гистерезиса.

Потери P_a (активная мощность) при частоте f в сегнетоконденсаторе выражаются произведением энергии, теряемой за цикл, на число циклов в секунду, т. е.

$$P_a = A_д \cdot f = f \oint u\,dq. \qquad (41)$$

Реактивная мощность может быть выражена для линейного конденсатора следующим образом:

$$P_р = U^2 \omega C = \frac{\omega}{2} U_m Q_m = \pi f U_m Q_m; \qquad (42)$$

так как $A_m = \frac{1}{2} U_m Q_m$ — максимальная энергия, запасенная в конденсаторе, то

$$P_р = 2\pi f A_m. \qquad (43)$$

Если условиться распространить это выражение и на нелинейные конденсаторы, что будет соответствовать введенному выше определению эффективной емкости,

$$C_э = \frac{Q_m}{U_m},$$

то тогда угол потерь нелинейного конденсатора определится следующим выражением (согласно 45 и 46):

$$\operatorname{tg} \delta_э = \frac{P_a}{P_р} = \frac{\oint u\,dq}{\pi U_m Q_m} \qquad (44)$$

или

$$\operatorname{tg} \delta_э = \frac{A_д}{2\pi A_m}. \qquad (45)$$

Тангенс угла потерь—это потери за один цикл, деленные на максимальную запасенную энергию в конденсаторе и на 2π. Величина $\delta_э$ может быть названа эффективным углом потерь сегнетоконденсатора. Значение $\operatorname{tg} \delta_э$ может быть определено также по полной S и активной P_a мощностям:

$$\operatorname{tg} \delta_э = \frac{P_a}{\sqrt{S^2 - P_a^2}}. \qquad (46)$$

Добротность сегнетоконденсатора $Q_э$ представляет величину, обратную тангенсу угла потерь

$$Q_э = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_э}; \tag{47}$$

согласно изложенному для добротности можно получить следующие выражения

$$Q_э = \frac{\pi Q_m U_m}{\oint u\, dq}; \tag{48}$$

$$Q_э = \frac{2\pi A_m}{A_д}; \tag{49}$$

$$Q_э = \frac{\sqrt{S^2 - P_a^2}}{P_a}. \tag{50}$$

Существенное значение имеют активная и реактивная мощности, отнесенные к единице объема конденсатора; они носят название удельной активной мощности $p_{a.уд}$ и удельной реактивной мощности $p_{p.уд}$.

Удельная активная мощность выражается следующим образом:

$$p_{a.уд} = \frac{U^2 \omega C_э \operatorname{tg} \delta_э}{v} 2\pi\varepsilon_э\varepsilon_0 f E^2 \operatorname{tg} \delta_э; \tag{51}$$

удельная реактивная мощность

$$p_{p.уд} = 2\pi\varepsilon_э\varepsilon_0 f E^2. \tag{52}$$

Из этих выражений видно, что удельные значения мощности зависят от свойств диэлектрика ($\varepsilon_э$, $\operatorname{tg} \delta_э$), напряженности поля E и частоты f. Таким образом, при неизменном режиме работы (f, E) электрической цепи удельные потери изменяются вместе с произведением $\varepsilon_э \operatorname{tg} \delta_э$. Это произведение именуют **эффективным коэффициентом потерь** сегнетокерамики

$$k_\delta = \varepsilon_э \operatorname{tg} \delta_э. \tag{53}$$

Угол потерь сегнетоконденсатора, диэлектрическая проницаемость, а следовательно и коэффициент потерь претерпевают изменения при изменениях температуры, напряженности поля и частоты. Кроме того, угол потерь изменяется также в течение некоторого времени после изготовления конденсатора.

5. Пьезоэффект

Сегнетокерамика приобретает пьезоэлектрические свойства лишь после воздействия на нее в течение известного времени сильного постоянного поля; сегнетокерамика становится пьезоэлектриком, а керамический конденсатор—пьезоэлементом. Эту

поляризацию в сильном постоянном поле можно назвать подготовительной поляризацией, а ось, вдоль которой направлена эта поляризация,—электрической осью образовавшегося пьезоэлемента. Когда к пьезоэлементу прикладывают нагрузку, то появление механических напряжений сопровождается изменением поляризации пьезоэлектрика; наоборот, если пьезоэлектрик поместить в электрическое поле, то оно вызовет механические напряжения и деформации в пьезоэлектрике. Это явление называют пьезоэффектом.

Различают прямой пьезоэффект и обратный. Прямой пьезоэффект—изменение поляризации пьезоэлектрика под действием приложенной к нему силы. При прямом пьезоэффекте на поверхности пьезоэлемента под влиянием механической нагрузки появляются электрические заряды. При изменении нагрузки в известных пределах поляризация изменяется пропорционально механическому напряжению, а также меняет знак вместе с ним. Обратный пьезоэффект—появление механических напряжений в пьезоэлектрике под действием приложенного к нему электрического поля. При обратном пьезоэффекте возникают деформации (сжатие, растяжение и др.) пьезоэлемента. Величина механического напряжения и деформации пропорциональна напряженности поля. Прямой пьезоэффект (так же как и обратный) может быть продольным или поперечным. Например, в случае прямого пьезоэффекта изменение поляризации пластинки под действием силы, действующей вдоль электрической оси (направление подготовительной поляризации в сегнетокерамике), представляет продольный пьезоэффект; изменение поляризации под действием силы, перпендикулярной электрической оси,—поперечный пьезоэффект.

Пьезоэлектрик испытывает в общем случае действие системы напряжений, которые могут вызываться либо внешними механическими силами, либо электрическими полями; эти напряжения можно разложить на шесть составляющих: нормальные напряжения вдоль трех координатных осей и напряжения сдвига относительно трех плоскостей, нормальных к координатным осям. Обычно пользуются правой системой координат; если нормальное напряжение сжимающее, ему приписывают знак плюс; растягивающее напряжение считается отрицательным. Нормальные составляющие напряжений вдоль осей x, y, z обозначают следующим образом: σ_{xx}, σ_{yy}, σ_{zz}; первая буква индекса указывает направление силы, вторая—направление нормали к поверхности, на которую действует сила. Согласно этому условию напряжение сдвига вдоль оси y относительно плоскости, перпендикулярной оси z, обозначают σ_{yz}; напряжение сдвига вдоль оси z относительно плоскости, перпендикулярной оси x, — σ_{zx}; напряжение сдвига вдоль оси x относительно плоскости, перпендикулярной оси y, — σ_{xy}. В общем случае составляющие поляризованности при прямом пьезоэф-

фекте связаны с составляющими механических напряжений следующими уравнениями:

$$\left.\begin{aligned}-P_x&=d_{11}\sigma_{xx}+d_{12}\sigma_{yy}+d_{13}\sigma_{zz}+d_{14}\sigma_{yz}+d_{15}\sigma_{zx}+d_{16}\sigma_{xy};\\-P_y&=d_{21}\sigma_{xx}+d_{22}\sigma_{yy}+d_{23}\sigma_{zz}+d_{24}\sigma_{yz}+d_{25}\sigma_{zx}+d_{26}\sigma_{xy};\\-P_z&=d_{31}\sigma_{xx}+d_{32}\sigma_{yy}+d_{33}\sigma_{zz}+d_{34}\sigma_{yz}+d_{35}\sigma_{zx}+d_{36}\sigma_{xy}.\end{aligned}\right\}\quad(54)$$

Величины d_{11}, d_{12}, ... d_{mn} носят название пьезоэлектрических модулей. Поляризованность P в системе единиц МКСА измеряется в *к/м*^{2}, а механическое напряжение в *н/м*^{2}; поэтому размерность пьезоэлектрического модуля d_{mn} измеряется в *к н*. Так как один кулон равен $3\cdot10^9$ единиц СГСε_0 количества электричества, а один ньютон равен 10^5 дин, находим следующее соотношение, которое может служить для перехода к системе СГСε_0:

$$d_{mn}\left[\frac{\text{кулон}}{\text{ньютон}}\right]=\frac{1}{3\cdot10^4}d_{mn}\left[\frac{\text{СГС}\varepsilon_0}{\text{дин}}\right].\qquad(55)$$

Пьезомодуль, характеризующий пьезоэффект, является коэффициентом пропорциональности между поляризованностью и механическим напряжением. Помимо пьезомодуля имеются и другие характеристики пьезоэффекта. Пьезоэффект зависит от направления сжимающей силы относительно осей кристалла и от типа его решетки. Для сегнетовой соли пьезоэффект определяется тремя пьезоэлектрическими модулями d_{14}, d_{25} и d_{36}. Каждый модуль представляет коэффициент пропорциональности между поляризованностью в направлении одной из осей и механическим напряжением сдвига, направленным перпендикулярно этой оси:

$$-P_x=d_{14}\sigma_{yz};\quad -P_y=d_{25}\sigma_{zx};\quad -P_z=d_{36}\sigma_{xy},\qquad(56)$$

где P_x, P_y и P_z—поляризованность соответственно вдоль осей x, y, z, численно равная плотности зарядов на поверхности пластины, а σ_{yz}, σ_{zx}, σ_{xy}—напряжения сдвига.

С помощью тех же пьезомодулей можно определить величины, характеризующие обратный пьезоэффект:

$$u_{xz}=d_{14}E_x;\quad u_{zx}=d_{25}E_y;\quad u_{xy}=d_{36}E_z,\qquad(57)$$

где

u_{xz}, u_{zx} и u_{xy}—составляющие деформаций сдвига,
E_x, E_y и E_z—составляющие напряженности поля.

Для тетрагональной структуры, которой обладают в определенном диапазоне температур сегнетоэлектрические кристаллы с решеткой типа перовскита (титанат бария и др.), справедливы равенства:

$$d_{24}=d_{15};\quad d_{32}=d_{31},\qquad(58)$$

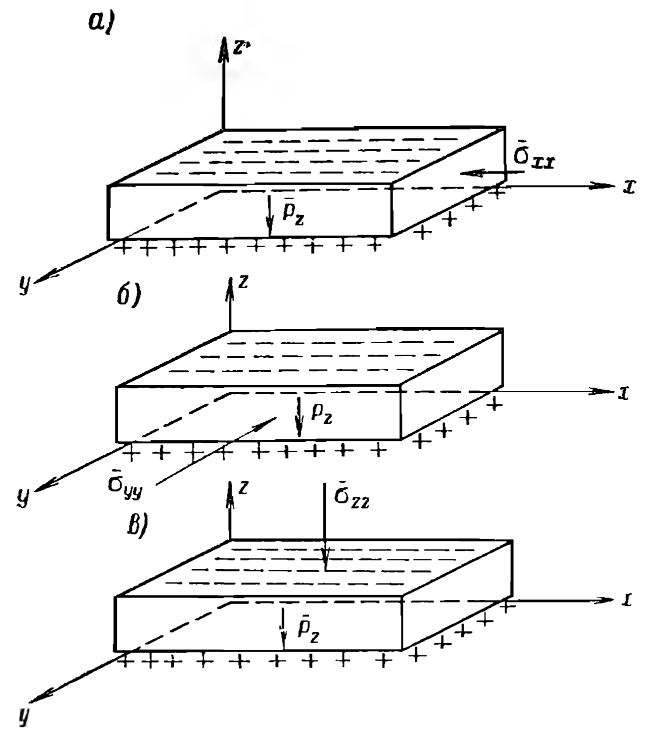
и уравнения (58) приобретают вид

$$-P_x = d_{15}\sigma_{zx}; \tag{59}$$

$$-P_y = d_{15}\sigma_{yz}; \tag{60}$$

$$-P_z = d_{31}\sigma_{xx} + d_{31}\sigma_{yy} + d_{33}\sigma_{zz}. \tag{61}$$

Если подготовительная поляризация проведена в направлении оси z, а образец испытывает только напряжение сжатия σ_{xx},



Фиг. 10. Поляризация пьезоэлемента при направлении механической силы: *а* — вдоль оси x; *б* вдоль оси y; *в* — вдоль оси z

перпендикулярное плоскости y—z, то не равна нулю только составляющая σ_{xx} (фиг. 10):

$$\left.\begin{aligned} -P_x &= 0; \\ -P_y &= 0; \\ -P_z &= d_{31}\sigma_{xx}. \end{aligned}\right\} \tag{62}$$

Заряды возникнут только на гранях, перпендикулярных оси z.

Если образец испытывает напряжение сжатия σ_{yy}, перпен-

дикулярное плоскости $z-x$ (направлено вдоль оси y), то не равна нулю только составляющая σ_{yy} (фиг. 10, *б*).

$$\left.\begin{aligned} -P_x&=0;\\ -P_y&=0;\\ -P_z&=d_{31}\sigma_{yy}. \end{aligned}\right\} \tag{63}$$

Заряды возникнут на тех же гранях, что и в первом случае.

При сжатии образца вдоль оси z не равна нулю только составляющая напряжения σ_{zz} и тогда (фиг. 10, *в*)

$$\left.\begin{aligned} P_x&=0;\\ P_y&=0;\\ -P_z&=d_{33}\sigma_{zz}. \end{aligned}\right\} \tag{64}$$

Эти условия, воспроизводимые при испытаниях керамических пьезоэлектриков, позволяют найти значение пьезомодулей d_{31} и d_{33}.

При статических нагрузках пьезоэлектрические свойства характеризуют статическими пьезомодулями.

Если к пьезоэлектрику прикладывать переменную нагрузку, то заряды, вызываемые пьезоэффектом, также будут изменяться; обратно, при переменном напряжении в пьезоэлектрике появятся переменные механические напряжения и переменные деформации. В этом случае пьезоэлектрик является резонатором, совершающим вынужденные колебания. Пьезоэффект при переменных механических усилиях или при переменных электрических полях характеризуют динамическими пьезомодулями.

6. Сопротивление изоляции конденсатора

Ток, протекающий через линейный конденсатор после его включения в цепь постоянного тока, вначале спадает, иногда сравнительно медленно, и затем сохраняет неизменную величину, именуемую сквозным током. Если уменьшить ординаты этой зависимости тока от времени на постоянную величину сквозного тока, то можно получить затухающую кривую, характеризующую ток абсорбции. Величину сопротивления изоляции конденсатора определяют условно по величине тока i_1, которая имеет место через одну минуту после включения под напряжение

$$R_{из}=\frac{U}{i_1}. \tag{65}$$

Очевидно, сопротивление изоляции в условиях длительной работы конденсатора под напряжением будет больше величины, найденной указанным путем, так как сквозной ток меньше тока, измеренного через одну минуту. Сопротивление изоля-

ции керамического линейного конденсатора связано с его объемным и поверхностным сопротивлениями, причем считают в первом приближении, что поверхностное сопротивление включено параллельно объемному сопротивлению. Оценку изоляции линейного конденсатора значительной емкости $C > 0{,}1$ *мкф* производят по приведенному сопротивлению R_I изоляции

$$R_I = R_{из} \cdot C, \quad (66)$$

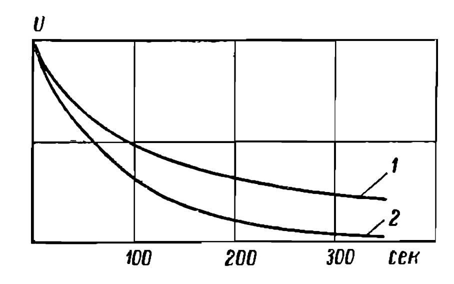
где C—емкость конденсатора.

Приведенное сопротивление называют также постоянной времени $\tau_к$ конденсатора

$$\tau_к = R_{из} \cdot C, \quad (67)$$

что объясняется следующим. Если конденсатор зарядить до напряжения $U_=$ и затем отключить его от источника, оставив разомкнутыми электроды, то происходит саморазряд конденсатора и его напряжение с течением времени τ снижается примерно по экспоненциальному закону

$$u = U_= e^{-\frac{\tau}{R_{из}C}}. \quad (68)$$



Фиг. 11. Зависимости напряжения на конденсаторе от времени при его разряде на активное сопротивление

1—сегнетоконденсатор; 2—слюдяной конденсатор; нормальная (статическая) емкость конденсаторов, измеренная баллистическим методом, одинакова

Процесс саморазряда конденсатора аналогичен в некоторой степени разряду конденсатора на активное сопротивление; величина $R_{из}$ играет роль внешнего сопротивления. Таким образом, постоянная времени $\tau_к$ представляет время, за которое напряжение при саморазряде конденсатора снижается до значения

$$u = \frac{1}{e} U_= = 0{,}37 U_=. \quad (69)$$

Для большинства типов линейных конденсаторов большой емкости постоянная времени сохраняет одно и то же значение в широком диапазоне емкостей. Исследования сегнетоконденсаторов показывают, что спадание тока со временем происходит медленно (см. фиг. 11). Однако сопротивления изоляции определяют по величине тока через одну минуту [формула (66)] после включения напряжения, т. е. так же, как и в случае линейного конденсатора. Разряд сегнетоконденсатора на постоянное сопротивление происходит по более сложному закону, нежели разряд линейного (например, слюдяного) конденсатора

(фиг. 11). В процессе снижения напряжения претерпевает изменение сама емкость, если ее рассматривать как отношение заряда на электродах к напряжению в данный момент времени. При изучении саморазряда сегнетоконденсатора можно установить, что не остается постоянной и емкость и сопротивление изоляции. Вследствие этого приведенное сопротивление можно сохранить в качестве характеристики не для широкого диапазона емкостей, а лишь для данного конденсатора с номинальным напряжением $U_н$ и номинальной емкостью $C_н$; в качестве сопротивления изоляции вводят при этом условную величину $R_{из}$, вычисленную по „одноминутному" току.

Заметим, что сопротивление изоляции тонкостенных сегнетокерамических конденсаторов с течением времени может снижаться, если конденсатор находится под воздействием постоянного напряжения и повышенной температуры или повышенной влажности.

7. Электрическая прочность конденсатора

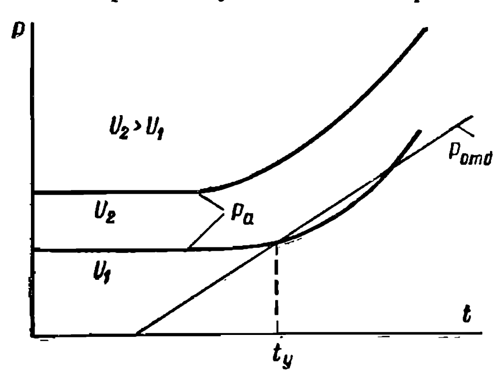
Повышение напряжения, приложенного к конденсатору, приводит в конце концов к разряду по поверхности между электродами (перекрытие) или к пробою изолирующего материала. Эти же явления могут иметь место и при нормальном рабочем напряжении в случае прогрессирующего изменения состояния диэлектрика. Напряжение, отвечающее разряду по поверхности, называют напряжением перекрытия $U_{пер}$. Напряжение, отвечающее пробою, называют пробивным напряжением $U_{пр}$, а соответствующую напряженность (градиент) $E=\frac{U_{пр}}{h}$ — пробивной напряженностью.

Однако еще до того, как напряжение достигнет величины, отвечающей перекрытию или пробою, в большинстве случаев начинается процесс частичных разрядов—разрядов у краев электродов конденсатора,—где поле неоднородно, а также в порах керамики. Частичные разряды в воздухе, в их ранней стадии, называют короной. Появление короны сопровождается увеличением потерь и образованием окислов озона и азота, отрицательно сказывающихся на свойствах конденсатора. Частичные разряды могут происходить и в самом изолирующем материале, если он имеет неоднородное строение, в электрически более слабых прослойках и включениях; в керамике особенно опасны газовые включения. Корона и частичные разряды носят характер неустановившегося процесса; вследствие этого при таких разрядах возникают высокочастотные колебания; амплитуды и спектр частот этих колебаний непрерывно изменяются, ввиду неустановившегося характера разрядов. Корону и другие частичные разряды можно обнаружить по появлению высокочастотных колебаний; частичные разряды

3*

вызывают также разогрев керамики. Напряжение, при котором возникают такие разряды заметной интенсивности, называют напряжением частичных разрядов $U_{ч.р}$. Пробой сегнетокерамики может носить характер электрического, термоионизационного или теплового пробоя.

Развитие теплового пробоя тесно связано с нагреванием диэлектрика и увеличением при этом диэлектрических потерь, что в свою очередь влечет за собой дальнейшее повышение температуры.



Фиг. 12. Температурные зависимости мощности P_a, поглощаемой конденсатором, и $P_{отд}$, отдаваемой в окружающую среду

Температурная зависимость выделяющейся в конденсаторе мощности (потерь) P_a при заданных неизменных напряжении U и частоте f в линейных конденсаторах определяется характером зависимости тангенса угла потерь конденсатора от температуры, ибо ε изменяется мало при изменениях температуры. При увеличении напряжения кривая $P_a(t)$ ложится выше (фиг. 12), однако, характер ее не изменяется. Мощность $P_{отд}$, отводимая в окружающую среду, практически пропорциональна разности между температурами конденсатора $t_к$, окружающей среды $t_{ср}$ и поверхности охлаждения $S_{ох}$

$$P_{отд} = \sigma S_{ох}(t_к - t_{ср}), \qquad (70)$$

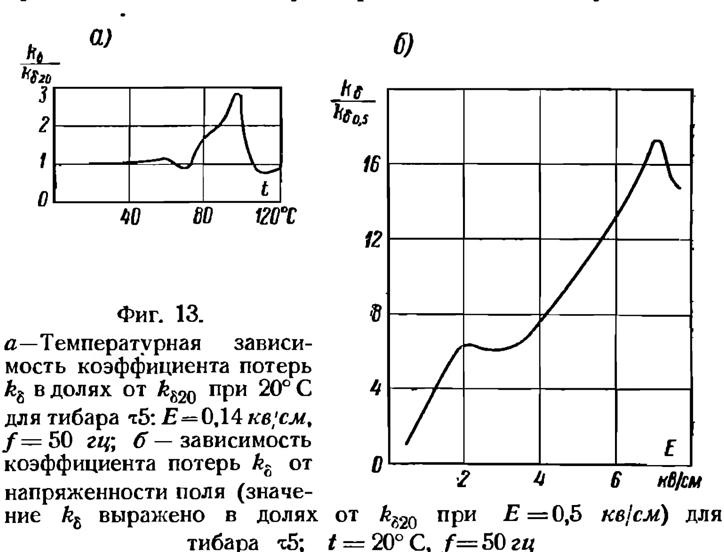
где σ—коэффициент теплоотдачи.

Зависимость $P_{отд}(t)$, изображаемая прямой, может пересекать или не пересекать кривую $P_a(t)$. Во втором случае (напряжение U_2, фиг. 12) потери в конденсаторе при всех температурах больше той мощности, которая может быть отведена за счет охлаждения, тепловое равновесие не установится и будет развиваться тепловой пробой. Если снизить напряжение до U_1, то кривая $P_a(t)$ пересечет кривую $P_{отд}(t)$ и при температуре t_y наступит тепловое равновесие.

При изменении температуры сегнетокерамики изменяется не только $\operatorname{tg}\delta_э$, но и диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_э$ сегнетокерамики; поэтому зависимость выделяющейся в сегнетоконденсаторе мощности P_a от температуры определяется характером температурной зависимости коэффициента потерь:

$$k_\delta = \varepsilon_э \operatorname{tg}\delta_э.$$

На фиг. 13, *а* представлены значения k_δ в относительных единицах для тибара τ_5 при напряженности поля $E \approx 1{,}4$ *кв/см*. За единицу принято значение при температуре $t=20°$ С. При увеличении напряженности поля изменяется как угол потерь, так и диэлектрическая проницаемость; зависимость k_δ от напряженности поля может иметь сложный характер (фиг. 13, *б*). Поэтому при повышении напряжения, приложенного к конденсатору, кривая $P_a(t)$ не только проходит выше кривой, соответствующей более низкому напряжению, как в случае линейного



Фиг. 13.
а—Температурная зависимость коэффициента потерь k_δ в долях от $k_{\delta 20}$ при 20° С для тибара τ5: $E=0{,}14$ *кв/см*, $f=50$ *гц*; *б* — зависимость коэффициента потерь k_δ от напряженности поля (значение k_δ выражено в долях от $k_{\delta 20}$ при $E=0{,}5$ *кв/см*) для тибара τ5; $t=20°$ С, $f=50$ *гц*

конденсатора, но и вдобавок изменяет в известной мере и свой характер.

Для некоторых видов сегнетокерамики при длительном воздействии электрического поля наблюдается постепенное снижение напряжения перекрытия и напряжения пробоя. В первом приближении зависимость пробивного напряжения от времени может быть выражена эмпирической формулой

$$U_{пр}=B\tau^{-\beta}, \tag{71}$$

где τ—продолжительность пребывания конденсатора под напряжением до пробоя, а B и β—коэффициенты, соответствующие типу сегнетокерамики, конструкции конденсатора и системе единиц измерения.

Это явление может быть резко выражено в случае длительного воздействия повышенного постоянного напряжения, приложенного к тонкостенному конденсатору, при высокой температуре или высокой влажности воздуха.

Номинальное напряжение $U_н$ конденсатора для обеспечения его электрической прочности выбирают значительно ниже наименьшей из величин $U_{ч.р}$ и $U_{пр}$ с учетом снижения электрической прочности со временем. При выборе напряжения необходимо учесть, что конденсатор должен работать под напряжением длительный промежуток времени; в практике конденсаторостроения этот промежуток исчисляется тысячами часов.

Если конденсатор предназначается для работы при повышенных температурах, приходится снижать его номинальное напряжение.

Зачастую величину напряжения целесообразно установить ниже требуемой по условиям электрической прочности, исходя из других соображений (глава шестая).

К конденсатору прикладывается на короткое время (примерно на 1 сек.) для обнаружения дефектов, появившихся при его изготовлении, испытательное напряжение; его берут несколько выше номинального напряжения, но с запасом по отношению к пробивному.

§ 8. Изменение параметров конденсатора

Параметры конденсатора во многих случаях изменяются под влиянием эксплуатационных условий, а также под влиянием времени. При этом различают изменения обратимые, которые исчезают после прекращения действия факторов, вызвавших эти изменения, и изменения необратимые. Первый вид изменений иногда называют обратимой нестабильностью параметров или цикличностью. Необратимые изменения представляют собой явления старения конденсатора; в результате старения имеет место прогрессирующее снижение пробивного напряжения (§ 7), сопротивления изоляции (§ 6), добротности и пр. Процессы старения сегнетокерамики еще нуждаются в дальнейшем изучении.

Обратимая нестабильность электрических характеристик сегнетоконденсаторов может быть обусловлена рядом причин — влиянием температуры, влажности, механических нагрузок, давления воздуха, напряженности и частоты электрического поля и др.

Параметры сегнетоконденсатора изменяются также в первые дни после его изготовления. Остановимся на температурных и временных изменениях емкости сегнетоконденсатора, хотя претерпевают изменения и другие параметры (добротность и др.).

Температурную зависимость емкости конденсатора характеризуют выражением, относящимся в основном к эффективной емкости

$$\alpha_{ct} = \frac{1}{C_э} \frac{dC_э}{dt}, \qquad (72)$$

где α_{ct} (иначе ТКС) температурный коэффициент емкости, измеряемый в $1/град$. В узком интервале температур при линейном изменении емкости температурный коэффициент может быть найден на основании значения этого интервала t_2-t_1 и соответствующего изменения емкости C_2-C_1:

$$\alpha_{ct}=\frac{C_2-C_1}{C_1(t_2-t_1)}. \quad (73)$$

Температурный коэффициент α_{ct} связан с температурными коэффициентами диэлектрической проницаемости α_ε, линейного расширения металла электродов $\alpha_м$ и линейного расщирения диэлектрика $\alpha_д$ следующей зависимостью:

$$\alpha_{ct}=\alpha_\varepsilon+2\alpha_м-\alpha_д. \quad (74)$$

Для керамических конденсаторов с электродами из серебра, нанесенного вжиганием или распылением, свободное расширение металла электродов невозможно и поэтому $\alpha_м=\alpha_д$; следовательно,

$$\alpha_{ct}=\alpha_\varepsilon+\alpha_д. \quad (75)$$

Учитывая, что коэффициент линейного расширения керамики обычно мал (порядка $5\cdot10^{-6}$ $1/град$) вторым членом в этом выражении пренебрегают. Таким образом, температурный ход емкости конденсатора определяется в основном температурной зависимостью диэлектрической проницаемости. Температурная зависимость емкости сегнетоконденсатора, вообще говоря, не имеет линейного характера и может в рабочем интервале температур проходить через максимум. В этом случае о колебаниях емкости конденсатора часто судят по относительному изменению емкости ΔC, отвечающему переходу от нормальных условий (температура $t=20\pm5^\circ$ С, емкость C_0) к наибольшей рабочей температуре (C_2), к наименьшей рабочей температуре (C_1), а также переходу к температуре, соответствующей максимуму в температурной зависимости емкости $C_{m.t}$, если этот максимум имеет место в рабочем интервале.

$$\Delta C_1=\frac{C_1-C_0}{C_0}100; \quad (76)$$

$$\Delta C_2=\frac{C_2-C_0}{C_0}100; \quad (77)$$

$$\Delta C_{m.t}=\frac{C_{м.t}-C_0}{C_0}100. \quad (78)$$

Иногда находят наибольшее C'' и наименьшее C' значение емкости в интервале рабочих температур и определяют относительное отклонение от средней величины

$$\Delta C_{cp} = \frac{C'' - C'}{C' + C''} 100. \qquad (79)$$

Заметим, что при оценке температурной зависимости емкости сегнетоконденсатора следует принимать во внимание также изменение емкости сегнетоконденсатора с течением времени.

Изменение со временем емкости конденсатора наблюдается в первые дни, а иногда и недели после его изготовления в том случае, если он хранится или работает в условиях слабого поля при температурах ниже точки Кюри. Подобные изменения могут возникнуть и спустя долгое время после изготовления, если конденсатор нагреть или приложить к нему напряжение. Эту зависимость характеризуют выражением, относящимся в основном к эффективной емкости

$$\alpha_{c\tau} = \frac{1}{C_э} \frac{dC_э}{d\tau}, \qquad (80)$$

где $\alpha_{c\tau}$—временнóй коэффициент емкости, измеряемый в 1/сутки. Зачастую этот коэффициент определяют спустя 14 дней после изготовления, причем измеряют суточное изменение емкости $\Delta C_{сут}$; в этом случае $\Delta\tau = 1$ и

$$\alpha_{c\tau} = \frac{\Delta C_{сут}}{C_э}. \qquad (81)$$

Глава вторая

СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

Явления, связанные со структурными особенностями и предопределяющие собой сегнетоэлектрические свойства керамических диэлектриков, изучены еще недостаточно полно, особенно для сравнительно новых систем, не содержащих титаната бария. При обсуждении этих явлений и их связи со свойствами сегнетокерамики мы остановимся, главным образом, на имеющихся физических представлениях, не касаясь расчетных приемов изучения проблемы, преследующих обычно своей целью истолкование и аналитическое определение некоторых параметров сегнетокерамики. В сегнетоэлектриках, не находящихся под воздействием внешнего поля, происходит самопроизвольная (спонтанная) поляризация, которая приводит к образованию в диэлектрике областей—доменов, состоящих из молекул, поляризованных в одном направлении. Спонтанная поляризация и образование доменов возможны при температуре ниже точки Кюри или (в некоторых веществах) в температурном интервале между точками Кюри. Наличие спонтанной поляризации, предопределяющей основные электрические свойства сегнетоэлектриков, является их главной чертой, отличающей от других диэлектриков.

9. Спонтанная поляризация титаната бария

В то время как сегнетоэлектрические свойства сегнетовой соли, а также фосфорнокислого и мышьяковокислого калия обусловлены спецификой водородной связи—сегнетоэлектрические свойства некоторых керамических материалов обусловлены особым типом ионной связи, имеющей место, главным образом, в кристаллах типа перовскита.

Перовскит $CaTiO_3$ обладает структурой, в которой ионы Ca^{2+} и O^{2-} образуют плотную упаковку, а ион Ti^{4+}, имеющий меньший размер, окружен шестью ионами O^{2-} и находится в центре этого октаэдра. Перовскит имеет сравнительно высокую диэлектрическую проницаемость—115.

Высокая диэлектрическая проницаемость перовскита впервые была установлена и объяснена Г. И. Сканави в 1944 г. Рассмотрим сегнетоэлектрические явления на примере титаната бария; следует указать, что помимо $BaTiO_3$ сейчас известен ряд других сегнетоэлектриков с аналогичными свойствами, но с несколько иной структурой. Титанат бария $BaTiO_3$ относится к титанатам металлов второй группы; среди других соединений титана с металлами второй группы $BaTiO_3$ имеет при комнатной температуре наиболее высокую диэлектрическую проницаемость (табл. 1). Титанат бария от некоторых родственных ему соединений ($CaTiO_3$, $SrTiO_3$) отличается тем, что у него расстояние между ионами титана и кислорода (в кубической структуре) больше суммы их радиусов; однако сегнетоэлектрические свойства наблюдаются и в таких кристаллах, у которых расстояние между четырехвалентным катионом (например Zr^{4+}) и кислородом меньше суммы их радиусов.

Таблица 1

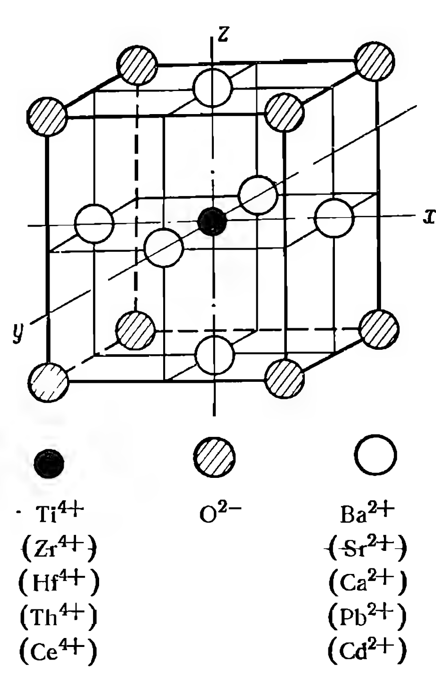
Значения $\varepsilon_э$ для некоторых титанатов металлов второй группы

Наименование	Тип кристаллической решетки	$\varepsilon_э$ при $t = 20° C$	Примечание
Титанат кальция	Перовскит	115	
» стронция	»	155	
» бария	»	>1000	
» кадмия	»	~150	Обжиг при $t > 1000° C$
» магния	Ильменит	17	
» кадмия	»	~20	Обжиг при $t < 1000° C$

При температуре выше точки Кюри титанат бария имеет кубическую форму решетки, то есть такую же форму кристаллической решетки, какой обладает минерал перовскит $CaTiO_3$ (фиг. 14а); заметим, что показанное расположение ионов является схематическим, так как размеры ионов в кристаллах типа перовскита могут превышать межионные расстояния, и тогда происходит „взаимопроникновение" ионов. Когда поликристаллический образец титаната бария охлаждается ниже точки Кюри (120° С), то, как показывают рентгенограммы, кубическая структура (фиг. 14б) переходит в тетрагональную. При дальнейшем понижении температуры, около 5° С происходит второй переход структуры из тетрагональной в орторомбическую; третий переход в тригональную решетку происходит около —70° С. Эти переходы, однако, не устраняют сегнетоэлектрических свойств, которые сохраняются во всей области ниже 120° С.

При переходе через эту точку в сторону более низких температур происходит спонтанная, т. е. самопроизвольная поля-

ризация сегнетоэлектрика, возникающая независимо от внешнего поля. Наличие этой поляризации вне сегнетоэлектрика не обнаруживается, так как он разбивается на ряд небольших областей (доменов), спонтанно-поляризованных в отсутствии внешнего поля. Каждая ячейка, будучи поляризованной, характеризуется своим вектором поляризованности P; в пределах домена все эти векторы, совпадая по направлению, дают общий вектор домена $\overline{P}_{дом}$. Векторы поляризованности доменов ориентированы по различным направлениям таким образом, что когда нет внешнего поля их геометрическая сумма равна нулю. Несмотря на наличие сильного поля в каждом домене, вне образца электрическое поле не обнаруживается. При таком состоянии энергия в единице объема диэлектрика меньше, чем удельная энергия диэлектрика со сплошной поляризацией, ибо при этом уменьшается энергия электрического поля, обусловленная поляризационными зарядами на поверхности кристалла. Энергия спонтанно поляризованного сегнетоэлектрика имеет минимум при определенных размерах доменов и поэтому такое состояние наиболее устойчиво.



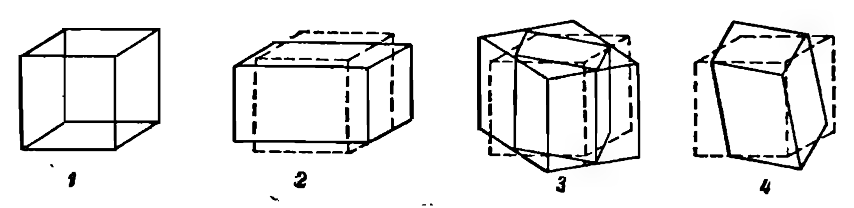
Фиг. 14а. Ячейка кристалла типа перовскита (кубическая структура)

При известных условиях получают однодоменные кристаллы; каждый такой кристалл состоит из одного домена с поляризованностью, направленной везде одинаково. В окружающей среде электрическое поле такого кристалла не проявляется, так как оседающие из воздуха свободные ионы компенсируют заряды, выступившие на поверхности при спонтанной поляризации.

Природа сегнетоэлектричества изучалась многими исследователями. Хотя исчерпывающего объяснения сегнетоэлектрических явлений мы еще не имеем, но представления о механизме этих явлений за последние годы в значительной мере оформились.

Для объяснения свойств титаната бария в 1945 г. Б. М. Вул высказал мысль, что ион титана смещается в кристалле по направлению к одному из ионов кислорода, вследствие чего возникает спонтанная поляризация. Исследования показали,

что при понижении температуры в область ниже точки Кюри наблюдается смещение не только ионов титана, но и других, причем ион Ti^{4+} и один из ионов O^{2-} смещаются навстречу друг к другу; вдоль этого направления кристалл вытяги-



Фиг. 14б. Структуры кристаллической решетки титаната бария
1—кубическая ($t>t_к$); *2*—тетрагональная (5° C$<t<t_к$); *3*—орторомбическая ($t\approx$5° C); *4*—тригональная ($t\approx$ −70° C)

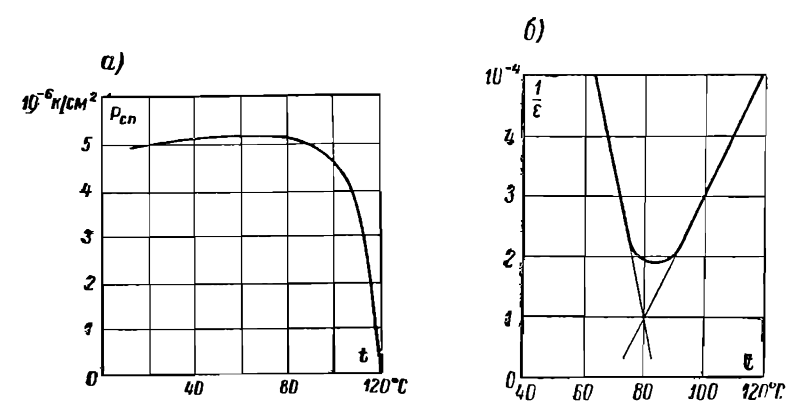
вается, вдоль двух других осей сжимается. Параметры решетки при тетрагональной структуре равны: $a=3{,}986\cdot10^{-8}$ *см*; $b=4{,}0259\cdot10^{-8}$ *см*. Когда при переходе через точку Кюри ионы титана и кислорода изменяют свое расположение, то электронные оболочки титана и кислорода проникают взаимно, примерно на $0{,}047\cdot10^{-8}$*см*.

O^{2-} Ti^{4+} Ba^{2+} (Sr^{2+}) (Ca^{2+})

Фиг. 14в. Кислородные октаэдры в кристалле типа перовскит; октаэдры касаются друг друга вершинами

В настоящее время считают, что ион титана находится в колебательном периодическом движении, причем эти колебания немного отличаются от синусоидальных, т.е. являются ангармоничными со сравнительно узким спектром частот. Такая точка зрения впервые была высказана в советских научных работах [Л. 9, 19]. Модель кристаллической решетки с ионами, совершающими ангармоничные колебания, была выдвинута в противовес прежнему представлению о вращающихся диполях или о перебрасываемых в разные равновесные положения ионах; эти представления оказались неприемлемыми для титаната бария и других ионных кристаллов—сегнетоэлектриков. В создании высокой спонтанной поляризованности $P_{сп}$ и высокой диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика исключительно важную роль играет действующее на различные ионы местное (локальное)

поле, величина которого существенно отличается от среднего электрического поля. Смещения иона Ti в его колебательном движении могут происходить вдоль любой из осей *x*, *y*, *z* (фиг. 14а). Но если температура диэлектрика ниже точки Кюри, то создаются условия, при которых ион Ti^{4+} и один из окружающих его ионов O^{2-}, расположенный, например, на оси *z*, сближаются друг с другом охотнее, чаще, чем с другими ионами. В результате эта ось становится осью спонтанной поляризации. Кислородные анионы, расположенные на этой оси (назовем их „активными"), оказываются в совершенно

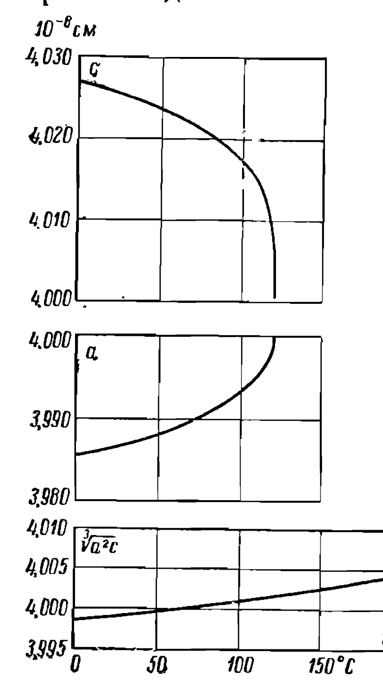


Фиг. 15. Температурные зависимости: *а*—спонтанной поляризованности в титанате бария; *б*—величины обратной диэлектрической проницаемости титаната бария с примесями

иных условиях, нежели ионы O^{2-}, находящиеся на других осях (так называемые „пассивные" ионы O^{2-}). Благодаря близости ионов Ti^{4+} „активные" кислородные ионы претерпевают более сильную электронную поляризацию, нежели „пассивные" ионы O^{2-}; у первых электронная поляризованность значительно выше, чем у вторых. Поле поляризованных „активных" ионов O^{2-}, расположенных в непосредственной близости от ионов Ti^{4+}, складывается со средним полем. В результате ионы Ti оказываются в свою очередь в сильном поле, значительно превышающем среднее, и эффект ионного смещения Ti увеличивается примерно в 16 раз. Ионы Ba и „пассивные" ионы O почти не поляризуются.

Структура типа перовскита является особенно благоприятной для появления спонтанной поляризации. Подсчеты показывают, что в $BaTiO_3$ составляющая поляризованности $P_{сп}$, обусловленная поляризацией ионов Ti, равна 37% (31%—за счет ионной и 6% за счет электронной поляризации), составляющая, обусловленная поляризацией „активных" ионов O^{2-}, равна 59%,

составляющая, обусловленная поляризацией „пассивных" ионов —6%; поляризация ионов Ba уменьшает общий результат на 2%. Итак, ионы Ti своим полем усиливают поляризацию „активных" ионов O; последние в свою очередь увеличивают поле, в котором находятся ионы Ti. Образуются линейные цепочки диполей, ориентированных в одном направлении,—появляется доменная структура. Заметим, что приведенная оценка эффектов поляризации различных ионов в кристалле $BaTiO_3$ является скорее иллюстрацией картины явления, нежели ее количественным описанием. Существенный интерес представляют явления, наблюдающиеся при переходе через точку Кюри. При повышении температуры и переходе ее через точку Кюри спонтанная поляризованность $P_{сп}$ убывает до нуля (фиг.15,*а*) [Л.34]. В точке Кюри происходит скачок удельной теплоемкости. В районе точки Кюри по обе стороны от нее имеет силу закон Кюри—Вейса, устанавливающий, что диэлектрическая проницаемость обратно пропорциональна разности температур — измеряемой t и в точке Кюри $t_к$



Фиг. 16. Температурные зависимости размеров кристаллической решетки вдоль осей *c* и *a*, а также параметра $\sqrt[3]{a^2c}$ для титаната бария

$$\varepsilon_э = \frac{K}{t - t_к}. \quad (82)$$

Зависимость $\frac{1}{\varepsilon_э}$ от разности $t—t_к$ выражается прямой линией; постоянная $K > 0$ при $t > t_к$ и $K < 0$ при $t < t_к$ (фиг. 15, *б*).

В точке Кюри изменяется кристаллическая структура: из тетрагональной она становится кубической. При этом с повышением температуры происходит непрерывное сжатие кристалла вдоль полярной оси (ось *c*, фиг.16) и расширение вдоль двух других осей (ось *a*), так что в точке Кюри размеры кристалла во всех трех направлениях становятся одинаковыми. Эти непрерывные изменения являются, однако, нелинейными, так как по мере приближения к точке Кюри они возрастают. Коэффициент линейного расширения имеет разрыв в точке Кюри и различные знаки для температурного изменения размеров вдоль полярной оси (сжатие при возрастании температуры вплоть до точки Кюри) и перпендикулярно к ней (расширение).

Для объяснения переходов в точке Кюри В. Л. Гинзбургом предложена термодинамическая теория, основывающаяся на энергетических закономерностях, имеющих место при изменении состояния системы. На основании представлений о фазовых переходах, теория которых разработана Л. Д. Ландау, была выдвинута гипотеза о наличии в титанате бария в точке Кюри фазового перехода второго рода или близкого к нему перехода первого рода. Фазовый переход второго рода отличается следующими основными особенностями. При переходе первого рода, примером которого может служить превращение ромбической структуры кристалла серы в моноклинную, в точке фазового изменения можно наблюдать и ту, и другую структуры, существующие одновременно, тогда как при переходе второго рода все вещество в точке перехода находится только в одном состоянии.

При переходе первого рода одно состояние частиц вещества скачкообразно сменяется другим состоянием, тогда как при переходе второго рода превращение, сохраняя прерывность, отличается тем, что изменения состояний крайне малы, так что новообразующаяся модификация при температуре, близкой к точке перехода, ничтожно мало отличается от старой модификации, и отличие становится заметным лишь при удалении от точки перехода. На основании изучения изменений параметров решетки титаната бария вблизи точки Кюри первоначально было выдвинуто предположение о наличии фазового перехода второго рода; при повышении температуры решетка из тетрагональной переходит в кубическую постепенно —изменения накапливаются на протяжении известного интервала температур путем мелких скачкообразных переходов. При этом новообразующаяся модификация продолжает находиться в стадии оформления и при температурах, находящихся за точкой Кюри. Этим можно было объяснить то, что особенно резкие изменения свойств титаната бария под влиянием внешних факторов наблюдаются в районе точки Кюри.

Рентгенографические наблюдения показывают, что длины осей, одна из которых (ось *c*) является осью поляризации, меняются непрерывно с изменением температуры, при переходе через точку Кюри (фиг. 16); можно допустить, что кубическая и тетрагональная структуры существуют одновременно в пропорции, зависящей от температуры. Более тщательные рентгенографические исследования приводят к заключению о том, что в титанате бария происходит, повидимому, „размытый“ фазовый переход первого рода, при котором также имеет место скачок теплоемкости, наблюдаемый в титанате бария. Термодинамическая теория сегнетоэлектрического перехода без учета анизотропии и механических напряжений, т. е. в предположении, что поляризация происходит только вдоль полярной оси, была построена В. Л. Гинзбургом еще в 1945 г.; в последующем

свойства сегнетоэлектриков были им рассмотрены более полно, с учетом анизотропии и упругих напряжений, т. е. с учетом пьезоэффекта. Дальнейшее развитие термодинамическая теория сегнетоэлектриков получила в работах Г. А. Смоленского и Р. Е. Пасынкова и других [Л. 14, Л. 19—22].

Термодинамические теории, позволяя получить для ряда величин хорошее совпадение с опытом, не исключают необходимости в построении молекулярной теории сегнетоэлектричества, дающей конкретную трактовку механизма явления. Ряд таких теорий появился в последние годы; остановимся кратко на некоторых из них.

Согласно Мезону и Маттиасу]Л. 37] между ионом Ti^{4+} и ионами O^{2-} имеются ковалентные связи; в пределах элементарного кристалла имеется 6 локальных (местных) минимумов потенциальной энергии, разделенных потенциальными барьерами.

Таким образом, ион титана может сместиться из центра и занять одно из шести положений равновесия вблизи иона кислорода. При смещении иона титана из центра появляется дипольный момент и электрическое поле, которое оказывает влияние на соседние ячейки, что и ведет к появлению спонтанной поляризации. Путем анализа этой модели были получены зависимости спонтанной поляризованности от температуры и выражения, позволяющие определить ряд характерных величин ($t_к$, ε и др).

В дальнейшем Г. А. Смоленский, а также Слейтер обнаружили, что не все результаты, получаемые согласно этой теории, соответствуют опытным данным для условий вблизи точки Кюри, а расчеты содержат дефекты. Слейтер полнее проанализировал процессы в элементарном кристалле сегнетоэлектрика и пришел к выводу, что ион Ti^{4+} расположен в неглубокой потенциальной выемке и совершает негармонические колебания около центра кристалла [Л. 38]; значение температуры Кюри определяется размерами центрального иона, размерами кислородного октаэдра и коэффициентом, учитывающим внутреннее поле. В ряде случаев эта теория лучше согласуется с опытом, однако, как показал Г. А. Смоленский, она применима, повидимому, не ко всем сегнетоэлектрикам с решеткой типа перовскита, так как она не в состоянии объяснить более высокие значения $t_к$ для $PbTiO_3$ (+500° С) и для $PbZrO_3$ (+235° С) (глава третья), нежели у титаната бария ($t_к$=120° С).

10. Спонтанная поляризация некоторых других керамических материалов

Изучение ряда соединений элементов, в основном принадлежащих к II, IV и V группам периодической системы, существенно расширило область керамических сегнетоэлектриков. Видное место среди этих работ занимают исследования Г. А. Смо-

ленского и его сотрудников, позволившие обнаружить, что сегнетоэлектрическими свойствами, помимо титаната бария, обладают и некоторые другие кристаллические вещества, в особенности те, которые имеют, как и титанат бария, структуру перовскита. Оказалось, что аналогично титанату бария могут быть синтезированы кристаллические соединения, в которых ион Ba замещен ионом двухвалентного металла Sr, Pb, Cd и др., а ион Ti—ионом четырехвалентного металла, например Zr (фиг. 14а).

Спонтанная поляризация подобных соединений обусловлена, как полагают, тем, что центральный ион четырехвалентного металла, находясь в ангармоническом колебательном движении, смещается в среднем к одному из ионов кислорода, месторасположение которого в свою очередь изменяется таким образом, что он оказывается ближе к иону титана; смещаются также и остальные ионы в решетке; это вызывает появление электрического дипольного момента. Этот момент тем больше, чем больше заряд центрального катиона (Ti, Zr и др.) и чем меньше его радиус. Кроме того, дипольный момент возрастает с увеличением размеров кислородного октаэдра и величины связи катион—анион. Размеры кислородного октаэдра, внутри которого находится ион четырехвалентного металла, зависят, возможно, и от величины двухвалентного катиона (Pb, Sr и др.). Внутреннее поле в этих диэлектриках зависит от взаимного расположения кислородных октаэдров; в структуре типа перовскита, где октаэдры касаются вершинами, оно больше, чем при другом типе строения (фиг. 14в). Эти соображения позволяют указать соединения, в которых можно ожидать появления сегнетоэлектрических свойств [Л. 14]; ряд теоретических предпосылок позволяет объяснить различие в температурах Кюри среди изученных керамических сегнетоэлектриков.

Исследование известных керамических сегнетоэлектриков показывает, что действительно их центральные катионы имеют малые размеры, большой заряд; они обладают электронным строением атома благородного газа с незаполненной предпоследней электронной оболочкой, которое возникает после удаления *s* и *d*-электронов; они октаэдрически окружены ионами кислорода. Кроме того, структурной особенностью сегнетоэлектриков является не чисто ионный характер связи между центральным катионом и окружающими его ионами кислорода. Эта связь является, повидимому, частично ковалентной. Исключением являются некоторые поликристаллы, содержащие ионы свинца Pb^{2+}. В этих соединениях спонтанная поляризация может возникнуть, если центральный катион и не имеет электронного строения благородного газа. Так, например, спонтанная поляризация возникает в твердых растворах в системе SnO_2—PbO—BaO, хотя оловинат бария $BaSnO_3$ не принадлежит к сегнетоэлектрикам. В этом случае центральным в кислородном октаэдре является ион Sn^{4+}; наличие сегнетоэлектрических

Таблица 2

Элементы периодической системы Д. И. Менделеева (I—VI группы)

Периоды	Ряды	Группы элементов I	II	III	IV	V	VI
I	1	1 H Водород					
II	2	3 Li Литий (0,78)	4 Be Берил-лий (0,31)	5 B Бор (0,20)	6 C Углерод	7 N Азот	8 O Кислород
III	3	11 Na Натрий (0,98)	12 Mg Магний (0,76)	13 Al Алюми-ний (0,57)	14 Si Кремний (0,39)	15 P Фосфор	16 S Сера
IV	4	19 K Калий (1,33)	20 Ca Кальций (1,06)	21 Sc Скандий (0,83)	22 Ti Титан (0,64)	23 V Ванадий (0,40)	24 Cr Хром (0,40)
	5	29 Cu Медь	30 Zn Цинк	31 Ga Галлий	32 Ge Германий	33 As Мышьяк	34 Se Селен
V	6	37 Rb Рубидий (1,49)	38 Sr Строн-ций (1,27)	39 Y Иттрий (1,06)	40 Zr Цирконий (0,77)	41 Nb Ниобий (0,69)	42 Mo Молибден (0,62)
	7	47 Ag Серебро	48 Cd Кадмий	49 In Индий	50 Sn Олово	51 Sb Сурьма	52 Te Теллур
VI	8	55 Cs Цезий (1,65)	56 Ba Барий (1,43)	57 La Лантан (1,22)	72 Hf Гафний (0,84)	73 Ta Тантал (0,68)	74 W Вольфрам (0,62)
	9	79 Au Золото	80 Hg Ртуть	81 Tl Таллий	82 Pb Свинец	83 Bi Висмут	84 Po Полоний
VII	10	•	88 Ra Радий (1,52)	89 Ac Актиний	90 Th Торий		

Примечание. Цифры в скобках указывают радиусы ионов (в 10^{-8} *см*) для координационного числа 6.

Таблица 3

Наиболее известные сегнетоэлектрики, не имеющие водородной связи

Соединение	Параметры решетки при $t = 20-26°$ С; размеры в ангстремах, углы в градусах	Температуры фазовых переходов, °С	Структура
$BaTiO_3$	$a = 3{,}986$; $b = 4{,}026$	+120	Перовскит
$SrTiO_3$	$a = b = 3{,}897$	—250	»
$PbTiO_3$	$a = 3{,}896$; $c = 4{,}1414$	+500	»
$CdTiO_3$	$a = c = 3{,}784$; $b = 3{,}800$ $\beta = 91°10'$	—210	»
$PbZrO_3$	$a = 4{,}140$; $c = 4{,}142$	┐235	»
$NaTaO_3$	$a = 5{,}524$; $b = 3{,}883$; $c = 5{,}478$	+475	»
$KTaO_3$	$a = 3{,}98\ 9$	—260	»
$PbTaO_3$	$a = 3{,}92$; $c = 4{,}51$	+247	»
$NaNbO_3$	$a = c = 2.3{,}921$ $b = 4.3{,}885$; $\beta = 90°4'$	+640 +480 +360	»
$KNbO_3$	$a = c = 4{,}045$ $b = 3{,}984$ $\beta = 90°21'$	+435 +225 — 10	»
$PbHfO_3$	$a = 4{,}136$; $b = 4{,}0988$	+215 +163	»
$LiTaO_3$	$a = 5{,}49$; $\alpha = 56°30'$	>450	Ильменит
$LiNbO_3$	$a = 5{,}47$; $\alpha = 55°43'$	450	»
WO_3	$a = 7{,}274$; $c = 3{,}824$ $b = 7{,}501$; $\beta = 89°56'$	+740 — 50	Трехокись рения
$Cd_2Nb_2O_7$	—	—90, —190	Пирохлор
$Sr_2Ta_2O_7$	—	— 90	»
$PbNb_2O_6$	—	+570	»
$PbTa_2O_6$	—	+260	»
$NaVO_3$	—	+380	»

свойств в этом твердом растворе, возможно, обусловлено влиянием сильно поляризуемых ионов свинца на характер связей между ионами. В добавление к сказанному следует отметить влияние на степень связи между ионами размеров кислородного октаэдра. При данном центральном ионе степень связи тем меньше, чем больше октаэдр.

В последнее время были обнаружены сегнетоэлектрические свойства и у некоторых кристаллов, имеющих структуру, отличающуюся от структуры перовскита; к их числу принадлежит танталат лития $LiTaO_3$, имеющий точку Кюри при $t = +650°$ С, а также трехокись вольфрама WO_3 с верхней точкой фазового перехода при $t = +740°$ С.

В периодической системе Д. И. Менделеева (табл. 2) выделены элементы Ti, Zr, Hf, V, Nb и Ta, находящиеся в центрах октаэдров решетки, наиболее известных в настоящее время керамических сегнетоэлектриков; эти ионы имеют строение атомов благородного газа, у которых нехватает *s* и *d*-электро-

нов. Трехокись вольфрама WO_3 (параметры решетки $a=7,274$; $b=7,501$; $\beta=89°54'$; $c=3,824$) также является сегнетоэлектриком с фазовыми переходами при температурах $t=-50°$ C и $t=+740°$ C. Изучение свойств этого соединения затруднено его значительной электропроводностью. Структура WO_3 представляет собой деформированную структуру ReO_3; она напоминает также структуру перовскита, в решетке которого удален ион Ca.

Наиболее известные керамические сегнетоэлектрики перечислены в табл. 3.

11. Спонтанная электрострикция в сегнетокерамике

В сегнетокерамике при температурах, близких к точке Кюри, помимо изменений диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь наблюдается скачок теплоемкости и коэффициента теплового расширения; последнее обстоятельство связано со спонтанными электрострикционными деформациями в сегнетокерамике.

При охлаждении от точки Кюри линейные размеры сегнетоэлектрика будут меняться как за счет обычного теплового сжатия, так и за счет изменений электрострикционных деформаций, обусловленных увеличением спонтанной поляризованности. Влияние электрострикционных деформаций в наибольшей степени оказывается при приближении к точке Кюри, когда спонтанная поляризованность от нуля возрастает до большой величины.

Диэлектрические свойства сегнетоэлектриков тесно связаны с внутренними механическими напряжениями и деформациями, имеющими место при переходе через точку Кюри, с наличием сжатых или растянутых участков. Такие механические напряжения возникают при понижении температуры и переходе ее через точку Кюри. Например, в титанате бария благодаря спонтанной поляризации каждый кристаллик удлиняется в направлении оси поляризации и сжимается в двух других перпендикулярных направлениях; в результате образец $BaTiO_3$ увеличивается в объеме при переходе в сегнетоэлектрическую область. Некоторые другие керамические сегнетоэлектрики уменьшают свой объем при переходе в область температур ниже точки Кюри. Изменение объема сегнетоэлектрика вследствие деформаций, сопровождающих спонтанную поляризацию, называют спонтанной объемной электрострикцией. Продольная электрострикция (вдоль оси спонтанной поляризации) всегда положительна; в настоящее время экспериментально не установлено существование сегнетоэлектриков с отрицательной продольной электрострикцией. Вместе с тем объемная электрострикция может быть либо положительной ($BaTiO_3$, $PbTiO_3$), либо отрицательной ($PbZrO_3$).

Продольная электрострикция (в направлении спонтанной

поляризации или поля) всегда сопутствует обратной ей по знаку поперечной электрострикции. Поэтому в зависимости от их количественного соотношения объемная электрострикция может быть как положительной, так и отрицательной. Знак спонтанной объемной электрострикции может быть определен по температурной зависимости коэффициента линейного расширения образца керамики. Если на кривой, выражающей эту зависимость, имеется минимум, то сегнетоэлектрик обладает положительной объемной электрострикцией, если максимум—отрицательной. Под воздействием гидростатического давления точка Кюри сегнетоэлектрика с положительной спонтанной объемной электрострикцией сдвигается в область более низких температур ($BaTiO_3$, $PbTiO_3$), при наличии отрицательной электрострикции—в область более высоких температур. Объемная электрострикция может быть равна нулю, если изменение объема за счет деформации кристалла по осям x, y компенсируется деформацией по оси z. В сложных поликристаллических системах объемная электрострикция может уменьшаться и также оказаться близкой к нулю в том случае, если входящие в состав системы соединения обладают различными по знаку объемными электрострикциями. Упругие механические напряжения в кристалле, в том числе и электрострикционные, затрудняют колебательные перемещения ионов титана (и вообще четырехвалентных ионов) из одного положения, соответствующего асимметричному расположению ионов относительно центра ячейки (при $t<t_к$),— в другое, также асимметричное; поэтому поляризованность и диэлектрическая проницаемость при отсутствии электрострикционных напряжений или при их небольшой величине должны достигать весьма высоких значений; следует учесть, что в рассматриваемом случае будут также малы и даже отсутствовать и стрикционные напряжения, появляющиеся в обычном сегнетоэлектрике под воздействием внешнего поля при температуре ниже точки Кюри. Сегнетокерамические материалы с малой объемной электрострикцией имеют весьма узкую петлю гистерезиса; зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности поля у них резкая, она переходит через максимум при относительно невысоких значениях E, величина диэлектрической проницаемости в градиентном максимуме может достигать значений, намного превышающих ε_m для титаната бария. Такие материалы с малой объемной электрострикцией в известном смысле подобны магнитному материалу—пермаллою и могут быть названы „электромягкими" сегнетоэлектриками,

Можно ожидать появления указанных свойств в двойных системах, получаемых на основе сегнетоэлектриков с различными по знаку объемными электрострикциями—при определенной концентрации компонентов и в известном диапазоне температур; примером могут служить системы $BaTiO_3—BaSnO_3$;

$PbTiO_3$—$PbZrO_3$; $BaTiO_3$—$BaZrO_3$ и др. Свойства „электромягкого“ сегнетоэлектрика в первой из указанных систем были обнаружены автором в 1947 году (глава третья). Обратно, на основе этих представлений, возможно получение „электрожестких“ сегнетоэлектриков с увеличенными внутренними электрострикционными напряжениями, обладающих широкой петлей гистерезиса (большой коэрцитивной напряженностью поля). Они имеют слабую зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности поля, хотя и являются сегнетоэлектриками. Примером такой системы может служить $BaTiO_3$ с добавкой $PbTiO_3$.

12. Сегнетокерамика в электрическом поле

В многодоменных кристаллах спонтанные электрические моменты отдельных областей, когда внешнее электрическое поле отсутствует, ориентированы таким образом, что их геометрическая сумма равняется нулю. Электрическая индукция D в сегнетокерамике, находящейся во внешнем электрическом поле, при температуре ниже точки Кюри складывается из индукции в вакууме D_0, поляризованности $P_{инд}$, вызванной индуцированной поляризацией и пропорциональной напряженности поля, и поляризованности $P_{сп}$, которая обусловлена изменениями спонтанной поляризации в доменах и, вообще говоря, непропорциональна напряженности поля

$$D = D_0 + P_{инд} + P_{сп}. \quad (83)$$

Последняя равна суммарному электрическому моменту доменов в единице объема

$$\overline{P}_{сп} = \frac{\sum \overline{P}_{дом}}{V}. \quad (84)$$

Таким образом, под действием внешнего электрического поля спонтанные моменты доменов изменяются и их сумма уже не равна нулю. Заметим, что в максимально поляризованных поликристаллических веществах (к ним принадлежит сегнетокерамика), если не учитывать влияния внутренних полей рассеивания, спонтанная поляризация в каждом кристалле должна быть направлена по той оси, которая имеет направление, ближайшее к направлению внешнего поля. Наибольший угол между полем и ближайшей осью кристалла тетрагональной структуры равен примерно 55° и соответствует случаю, когда поле направлено по диагонали кристалла. В поликристалле можно считать, что $P_{сп.макс} = 0{,}8P_{мон}$, где $P_{мон}$—спонтанная поляризация в монокристалле; такой поликристалл в диэлектрическом отношении весьма близок к монокристаллу.

Изменения, происходящие в доменах под воздействием внешнего электрического поля, проводя формальную аналогию с процессом намагничения ферромагнетиков, разбивают на две группы: изменения в слабых полях и изменения в сильных полях. В относительно слабых полях электрический момент в единице объема увеличивается за счет инверсии—процесса перемещения пограничного слоя между 180° (антипараллельными) областями (доменами) и между 90° областями (образующими угол 90° с благоприятно ориентированными областями); домен с благоприятной ориентацией спонтанного момента, т. е. домен, у которого полярная ось образует небольшой угол (или угол, равный нулю) с направлением поля, возрастает в объеме за счет соседних областей. Пограничный слой должен иметь некоторую толщину, определяемую условиями минимума свободной энергии. Наличие внутренних механических напряжений в пограничных слоях между доменами затрудняет процесс передвижения этих слоев, происходящий при нарастании поля.

Если бы внутри кристалла не существовало бы никаких внутренних напряжений, процесс инверсии происходил бы при значении напряженности внешнего поля, близкой к нулю. При понижении температуры и переходе ее через точку Кюри происходит изменение размеров сегнетоэлектрика (в связи с образованием доменов) за счет изменения формы и размеров кристаллической ячейки—процесс спонтанной электрострикции. Появление внутренних напряжений обязано как этому процессу, так и наличию некоторых вводимых примесей, а также факторов технологического происхождения.

Перемещение пограничного слоя задерживается в связи с местными препятствиями, сжатыми или растянутыми участками. Для перемещения требуется увеличение потенциальной энергии пограничного слоя за счет внешнего поля. Под воздействием поля пограничный слой скачком смещается в новое положение. При малой объемной спонтанной электрострикции процесс интенсивной инверсии может происходить даже в относительно слабых полях. Иными словами в этом случае даже при слабом поле $E_{ср}$ появится большой спонтанный момент в единице объема $P_{сп}$. Диэлектрическая проницаемость сегнетокерамики обусловлена величиной индуцированной поляризованности и величиной спонтанной поляризованности, отнесенными к среднему макроскопическому градиенту поля в сегнетоэлектрике; при температуре $t < t_к$ поляризованность $P_{инд} \ll P_{сп}$.

$$\varepsilon = 1 + \frac{P_{инд} + P_{сп}}{\varepsilon_0 E}. \qquad (85)$$

Поэтому материалы с малой или близкой к нулю спонтанной электрострикцией должны обладать резкой зависимостью диэлектрической проницаемости $\varepsilon_э$ от градиента поля; они могут

иметь более высокое значение $\varepsilon_э$ в районе точки Кюри, чем титанат бария.

Процесс инверсии характеризуется непропорционально большим—по сравнению с ростом градиента внешнего поля—увеличением поляризованности сегнетоэлектрика, так как резко растет суммарный электрический момент в единице объема при смещении пограничных слоев между доменами и увеличиваются домены с благоприятной ориентацией полярных осей. Вблизи точки Кюри даже слабое внешнее поле может вызвать большие упругие изменения в колебательных смещениях ионов, ибо в точке Кюри при снижении температуры возникает их самопроизвольное смещение, ведущее к спонтанной поляризации. Вследствие этого наблюдается более или менее острый максимум в температурной зависимости диэлектрической проницаемости сегнетокерамики в точке Кюри. Для сегнетокерамики с малой спонтанной электрострикцией значение диэлектрической проницаемости в точке Кюри может быть намного выше, чем в титанате бария.

Заметим, что изменение ориентации электрических моментов отдельных кристаллов (ячеек) в пограничной зоне между доменами, которое и влечет смещение пограничного слоя (инверсию), осуществляется не путем поворота молекул, а путем изменения направления среднего смещения ионов, что и приводит к соответствующему изменению направления электрических моментов ряда кристаллов, прилегающих к пограничному слою. При дальнейшем усилении поля наступит состояние, характеризующееся исчезновением 180 и 90° доменов; имеются только благоприятно ориентированные домены. Дальнейшее увеличение поля вызывает, как полагают, поворот полярной оси домена в целом, процесс, который может быть назван вращением.

В некоторых сегнетоэлектриках процесс инверсии выражен слабо и главную роль играют процессы вращения. При увеличении напряженности поля диэлектрическая проницаемость вначале увеличивается (зачастую весьма резко), а затем начинает снижаться. Возрастание диэлектрической проницаемости с ростом напряженности объясняется тем, что увеличение суммарного электрического момента доменов $P_{сп}$ в единице объема происходит быстрее, нежели повышение напряженности поля.

При известном значении напряженности поля наступает состояние, при котором дальнейшее усиление поля сопровождается сравнительно слабым увеличением электрического момента, увеличение поляризованности $P_{сп}$ начинает происходить медленнее, чем возрастание поля. Это состояние соответствует насыщению сегнетоэлектрика. Далее с увеличением напряженности поля диэлектрическая проницаемость снижается.

Влияние возрастания поля на диэлектрическую проницаемость можно объяснить также исходя из представлений о по-

степенном увеличении числа доменов, в которых происходит изменение ориентации моментов под действием поля. Было обнаружено, что в монокристалле $BaTiO_3$ при напряженности встречного поля около 500 *в/см* одновременно изменяется ориентация 180° моментов всех доменов; при более слабом поле переориентации не обнаруживается. В поликристаллическом материале изменение ориентации различных доменов происходит не при одной и той же напряженности поля. По мере роста напряженности поля процесс поляризации захватывает все большее число доменов, диэлектрическая проницаемость увеличивается. Однако при некотором значении напряженности поля уже почти во всех доменах моменты будут ориентированы по полю. При дальнейшем усилении поля поляризованность будет слабо возрастать лишь за счет индуцированной составляющей, и диэлектрическая проницаемость начнет снижаться.

По мере возрастания поля максимум в температурной зависимости диэлектрической проницаемости в точке Кюри постепенно сглаживается; в сильных полях максимум находится уже не в точке Кюри, а в области более низких температур, причем этот максимум выражен менее резко, а диэлектрическая проницаемость может намного превосходить величину ε в точке Кюри в условиях слабого поля.

При температурах ниже точки Кюри, вблизи нее, при слабых полях действуют два фактора: уменьшение спонтанной поляризованности с нагреванием и возрастание числа „переориентируемых“ доменов. По мере приближения к точке Кюри процесс переориентации облегчается, благодаря чему в слабом поле увеличивается та часть доменов, в которых моменты ориентируются по полю; поэтому диэлектрическая проницаемость увеличивается и в точке Кюри достигает наибольшего значения. Иная картина в случае сильного поля. Под действием поля все моменты уже ориентированы по полю; при нагревании и приближении к точке Кюри уменьшаются сами моменты и их суммарная величина, поэтому диэлектрическая проницаемость должна снижаться; максимум в температурной зависимости диэлектрической проницаемости уже наблюдается не в точке Кюри, а при более низкой температуре.

Для сегнетокерамики характерны обратимые изменения диэлектрической проницаемости и потерь с течением времени, особенно в первые дни после спекания и нанесения электродов [Л. 27, 39]. Прогревание при температуре значительно выше точки Кюри приводит к восстановлению практически первоначальных значений ε и $\operatorname{tg}\delta$, однако затем при нормальной температуре эти изменения наблюдаются снова, как и до нагрева. Аналогичный эффект имеет место после того, как на короткое время прикладывают сильное поле, постоянное или переменное. Особенно заметное влияние оказывает одновременное действие нагрева и сильного поля.

Обратимые изменения проявляются тем сильнее, чем меньше интервал температур, отделяющих нормальную температуру от температуры в точке Кюри. Заметим, что в ряде материалов обратимые изменения наблюдаются и при температурах несколько выше точки Кюри.

Уменьшение диэлектрической проницаемости со временем следует связывать с изменением спонтанной, а возможно и релаксационной поляризованности. При нормальной температуре, если она ниже температуры в точке Кюри, изменения обусловлены сравнительно медленным процессом формирования доменов. Этому процессу сопутствует рост электрострикционных напряжений. Когда эти напряжения малы, поляризация облегчена и диэлектрическая проницаемость высока, с течением времени объемная электрострикция увеличивается, и диэлектрическая проницаемость снижается. При нагревании до температуры выше точки Кюри происходит распад доменной структуры, поэтому после охлаждения указанные изменения должны повторяться. Под действием сильного электрического поля происходит ориентация по полю электрических моментов доменов, после снятия поля поляризованность велика; однако со временем она уменьшается вследствие изменения ориентации моментов части доменов. Таким образом, временны́е изменения параметров сегнетокерамики следует рассматривать как результат завершения процессов образования доменной структуры, соответствующей минимуму энергии.

В заключение следует отметить, что изложенные представления еще не могут считаться исчерпывающими и охватывающими в достаточной мере все стороны явления; ряд вопросов нуждается в дальнейшем выяснении.

Аномальные свойства сегнетокерамики получают более широкое истолкование по мере продолжающегося интенсивного изучения сегнетоэлектрических явлений. Так, в последнее время было обнаружено, что при действии достаточно сильного поля начинается зарождение новых доменов. Это может происходить наряду со смещением стенок.

Глава третья

КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ОБЛАДАЮЩИЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Керамические материалы рассматриваемого класса находятся в стадии интенсивного развития. К титанату бария—первому керамическому сегнетоэлектрику—за истекшее десятилетие присоединились многие другие соединения как на основе $BaTiO_3$, так и не содержащие окислов титана или бария или тех и других.

Все титанаты двухвалентных металлов, имеющие структуру типа перовскита, за исключением $CaTiO_3$ обладают свойствами сегнетоэлектриков. Этой же структурой обладает $PbZrO_3$ и ряд других соединений, не содержащих титана.

Эти соединения, обнаруживающие сегнетоэлектрические свойства в определенной области температур, являются в большинстве керамическими материалами; по этим причинам эта группа материалов получила название сегнетокерамики. Не все синтезированные и обследованные керамические сегнетоэлектрики имеют в настоящее время техническое значение. Многие из них представляют пока чисто теоретический интерес и не получили еще практического применения. Однако возможности их использования для синтезирования новых сложных видов сегнетокерамики со специфическими свойствами еще далеко не исчерпаны и поэтому изложение основных данных, характеризующих и эти сегнетоэлектрики, является необходимым. Несмотря на большое число работ, посвященных различным сегнетокерамическим соединениям и материалам, эти работы в основном касаются отдельных вопросов этой обширной области и не являются одинаково полными с интересующей нас точки зрения. Иногда приходится встречаться с противоречивыми данными, с неясностями и слабо освещенными вопросами, разрешение которых требует дополнительных экспериментальных исследований. В связи с этим настоящий обзор ограничен некоторыми материалами, представляющими, повидимому, наибольший интерес.

Приведенными данными, за исключением второстепенных и отрывочных, почти исчерпываются сведения об основных

силикатных системах с сегнетоэлектрическими свойствами. На основании накопленных результатов можно сделать вывод о возможности синтезирования двойных, тройных и более сложных систем типа твердых растворов; тройные соединения в этих системах зачастую не образуются непосредственно из окислов, но получаются путем реакций между двойными соединениями. Разнообразие химико-физических факторов, влияющих на ход реакций при образовании систем с сегнетоэлектрическими свойствами, чрезвычайно велико; пока невозможно еще, исходя из состава сегнетокерамики, теоретически определить ее свойства и приходится каждый раз прибегать к эксперименту. Тем не менее уже сейчас намечается ряд путей для регулирования этих свойств и решения специфических задач—получение высоких значений диэлектрической проницаемости, эффективной нелинейности, смещение точки Кюри вдоль шкалы температур и других.

Обширное многообразие сегнетоэлектрических систем и их сочетаний являются многообещающей предпосылкой плодотворных применений сегнетокерамики при разрешении инженерных проблем.

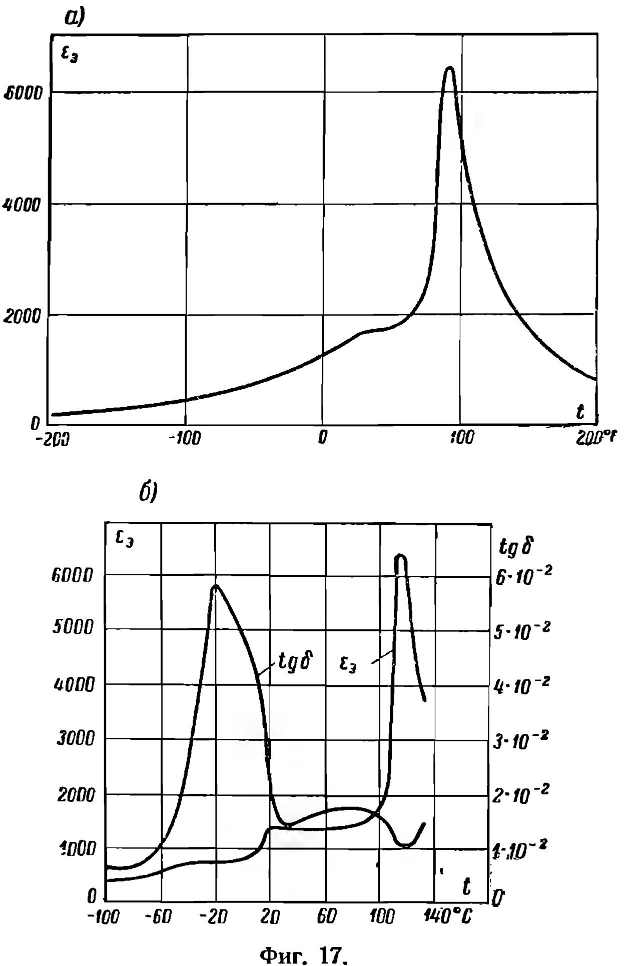
13. Титанат бария

Свойства титаната бария впервые изучались Б. М. Вулом с сотрудниками, а затем и другими исследователями на поликристаллических образцах [Л. 36]. Образцы изготовлялись из углекислого бария $BaCO_3$ и двуокиси титана TiO_2; весовое соотношение между ними с учетом незначительных примесей соответствовало формуле $BaO—TiO_2$, т. е. формуле метатитаната бария. Отпрессованные из этой смеси диски обжигались при температуре около 1450°, при чем оказалось, что при специфических условиях вместо тетрагональной структуры образуется структура, близкая к ромбоэдрической (параметры решетки $a=b=c=4{,}04\cdot10^{-8}$ *см*, $\beta\approx90°$); эта модификация титаната бария не обладает сегнетоэлектрическими свойствами, диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_э\approx50$.

Свойствами сегнетоэлектрика обладает титанат бария с тетрагональной структурой ниже точки Кюри; эти свойства были первоначально изучены на поликристаллических образцах. Последующее изучение свойств на монокристаллах подтвердило все полученные ранее закономерности.

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости в слабых полях, снятая в Физическом институте АН СССР, показывает, что наибольшее значение диэлектрической проницаемости имеет место при 80° С и составляет свыше 6000 (фиг. 17, *а*); положение максимума в зависимости от содержания примесей может меняться от 80 до 120° С (фиг. 17, *б*) [Л. 40]. Угол диэлектрических потерь, достигая наибольшей величины

($\operatorname{tg}\delta_э = 6 \cdot 10^{-2}$) при температуре —20° С, затем падает, дважды проходя через минимум. Второй минимум отвечает точке Кюри при 120° С. При частоте 10^3 *гц* в слабом поле $\operatorname{tg}\delta_э = 0{,}02$ при



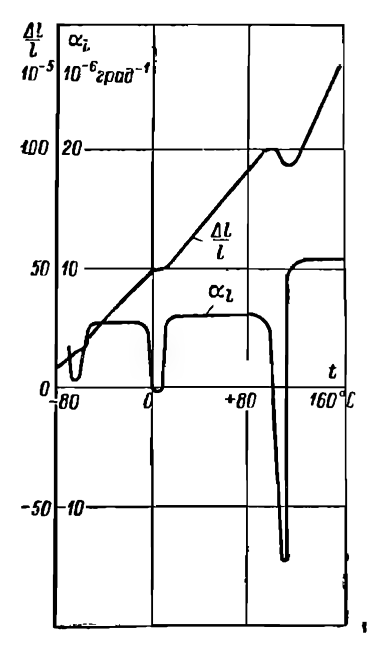
Фиг. 17.

а—Зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария с точкой Кюри $t_к = 80°$ С от температуры; $f = 50$ *гц*; *б*—температурные зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь титаната бария с точкой Кюри $t_к = 120°$ С; $E = 2{,}29$ *в/см*; $f = 10^3$ *гц*

нормальной температуре. При низких температурах диэлектрическая проницаемость сохраняет все еще высокое значение— в жидком кислороде (—172,1° С) $\varepsilon_э = 250$, в твердом азоте (—213° С) $\varepsilon_э = 165$, в твердом водороде (—259° С) $\varepsilon_э = 114$ и в жидком гелии (—271° С) $\varepsilon_э = 100$ [Л. 8]. При слабых полях

диэлектрическая проницаемость имеет в точке Кюри ($t_к=120°$) значение 6600. С увеличением градиента значение $\varepsilon_э$ возрастает до известного предела; зависимость $\varepsilon_э$ от напряженности поля сохраняется вплоть до очень низких температур и исчезает при температурах выше точки Кюри.

На основании температурных зависимостей относительного удлинения и температурного коэффициента расширения (фиг. 18) можно сделать вывод о том, что вблизи точки Кюри происходит уменьшение объема с возрастанием температуры. Это объясняется уменьшением спонтанной объемной электрострикции, сопровождающим снижение спонтанной поляризации. Таким образом, титанат бария обладает положительной спонтанной объемной электрострикцией.

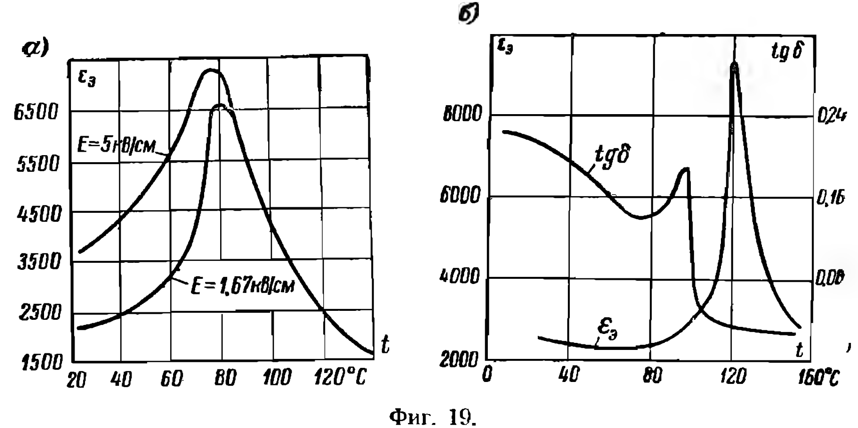


Фиг. 18. Зависимости относительного удлинения $\frac{\Delta l}{l}$ и температурного коэффициента расширения образца титаната бария от температуры

В сильных полях изменяется характер температурной зависимости диэлектрической проницаемости; при увеличении напряженности поля диэлектрическая проницаемость возрастает (фиг. 19), но только в сегнетоэлектрической области; дальнейшее увеличение поля сопровождается снижением $\varepsilon_э$. В сильных полях растет угол диэлектрических потерь и изменяется характер температурной зависимости $tg\,\delta_э$ (фиг. 19 *б*); при нормальной температуре $tg\,\delta_э=0{,}22$ ($E=1{,}18$ *кв/см*, $f=10^4$ *гц*). Измерения нормальной (статической) диэлектрической проницаемости баллистическим методом показывают, что значения $\varepsilon_=$ могут достигать $\sim 14\,000$ при значениях напряженности поля порядка нескольких киловольт на сантиметр (фиг. 20). Диэлектрическая проницаемость титаната бария, измеренная при постоянном токе, но при коротких промежутках времени зарядки (10^{-8} ... 10^{-4} сек.) и при сильных полях ($E=5$ ... 15 *кв/см*), зависит от длительности воздействия поля [Л. 41]. При увеличении длительности зарядки в указанном интервале времени величина $\varepsilon_=$ возрастает в 2,5 раза.

Реверсивная диэлектрическая проницаемость была измерена в широком диапазоне температур —от $-183°$ С до $+178°$ С при переменном напряжении $U_{макс}=5$ *в* и частоте $f=4\cdot10^5$ *гц*-

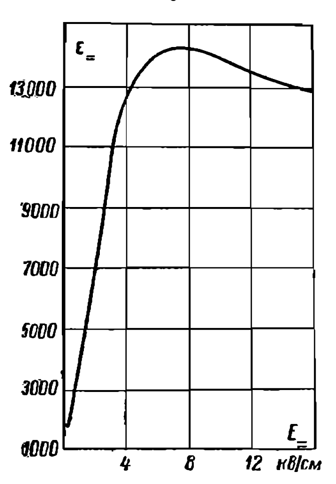
Напряженность постоянного поля увеличивалась до 10 *кв/см*. Оказалось, что при температурах, значительно отличающихся от точки Кюри (например —183° С и +178° С), реверсивная



Фиг. 19.

а—Температурные зависимости диэлектрической проницаемости титаната бария, содержащего небольшие примеси, в сильных полях; $f=50$ *гц*; *б*—температурные зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь титаната бария в сильном поле; $E=1,18$ *кв/см*; $f=10^4$ *гц*

диэлектрическая проницаемость не зависит от постоянного поля; вблизи точки Кюри постоянное поле вызывает уменьшение проницаемости. При 17° С реверсивная диэлектрическая проницаемость изменялась при указанном повышении напряженности поля от 1650 до 1400.

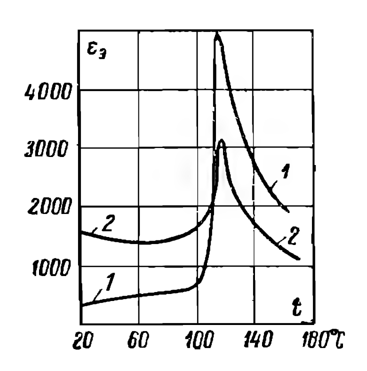


Фиг. 20. Зависимость диэлектрической проницаемости $\varepsilon_=$ титаната бария от напряженности постоянного поля; $t\approx20°$ С

При переменном токе влияние изменения частоты на диэлектрическую проницаемость проявляется по-разному в зависимости от величины градиента поля. В сильных полях ($E=10 \ldots 25$ *кв/см*) диэлектрическая проницаемость снижается с ростом частоты; так при возрастании частоты от $2\cdot10^2$ до 10^4 *гц* диэлектрическая проницаемость уменьшается в 1,5—2 раза.

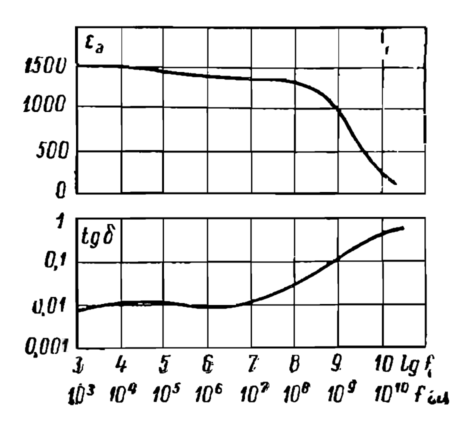
В слабых полях частотная зависимость диэлектрической проницаемости первоначально была исследована в интервале от 50 *гц* и до 1, 5, 10^8 *гц* [Л. 8]; оказалось, что диэлектрическая проницаемость почти не изменяется в этом интервале частот, и даже при $f=1,25\cdot10^9$ *гц* все еще сохраняет высокое значение [Л. 42, 43]. Исследования, проведенные в Физическом институте АН СССР Н. В. Богдановым, показали, что

частота релаксации диэлектрической проницаемости титаната бария составляет около $3 \cdot 10^9$ *гц*. Таким образом, при более высоких частотах диэлектрическая проницаемость должна уменьшаться. Действительно, измерения, проведенные при частоте $f=9,45 \cdot 10^9$ *гц*, показали, что диэлектрическая проницаемость при этой частоте значительно ниже, чем при частоте $f=1,5 \cdot 10^6$ *гц* (фиг. 21). При частоте $2,4 \cdot 10^{10}$ *гц* значение $\varepsilon_э$ падает до 126 (при $t=20°$ С), тогда как при частоте $f=9,45 \cdot 10^9$ *гц* оно равнялось 300, а при частоте $f=1,5 \cdot 10^6$ *гц* составляло 1500.



Фиг. 21. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария в слабом поле

1 — при частоте $f=1,5 \cdot 10^6$ *гц*; *2* — при частоте $f=9,45 \cdot 10^9$ *гц*



Фиг. 22. Частотные зависимости эффективной диэлектрической проницаемости и угла потерь титаната бария в слабых полях при нормальной температуре

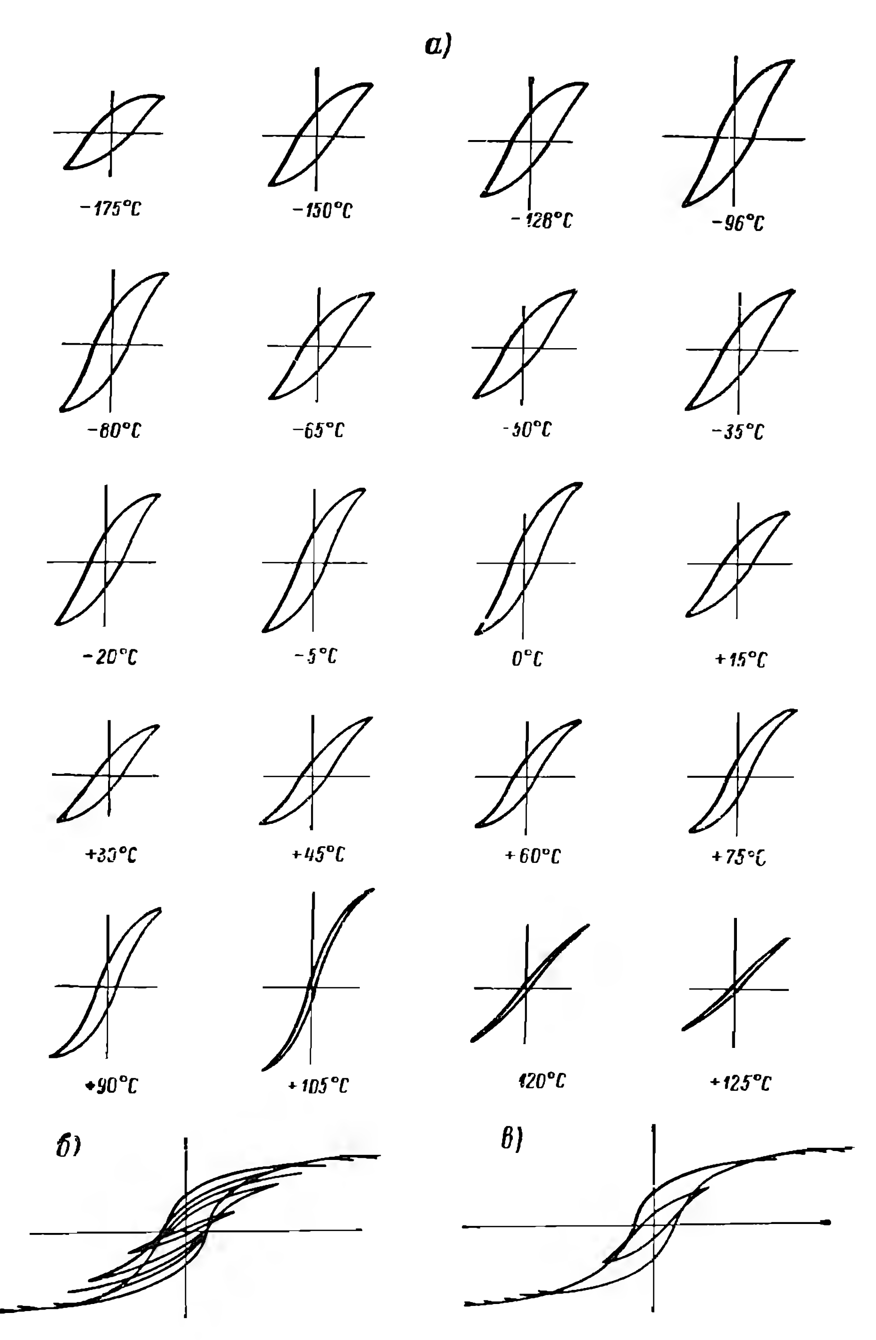
Одновременно растет тангенс угла потерь: при $f=1,5 \cdot 10^6$ *гц* $\operatorname{tg} \delta_э=1,5 \cdot 10^{-2}$; при $f=9,45 \cdot 10^9$ *гц* $\operatorname{tg} \delta_э=5,3 \cdot 10^{-1}$; при $f=2,4 \cdot 10^9$ *гц* $\operatorname{tg} \delta_э=5,9 \cdot 10^{-1}$ [Л. 44]. В силу высокой диэлектрической проницаемости и сильного поглощения в области микроволн трудно получить сколько-нибудь точные температурные характеристики. Заметим также, что ввиду влияния на диэлектрическую проницаемость и угол потерь градиента поля измерения при различных частотах следовало бы проводить при одних и тех же значениях *E*. Однако для разных диапазонов частот применяют различные методы измерения, в результате чего указанное условие едва ли удастся соблюсти. Вдобавок с повышением частоты увеличивается количество тепла, выделяемое в образце из-за диэлектрических потерь; это обстоятельство, особенно в сильных полях, приводит к повышению температуры образца, что в свою очередь сказывается на величине диэлектрической проницаемости и величине угла потерь, которые, как уже было отмечено, изменяются при изменении температуры. По этим причинам результаты измерений при различных частотах трудно сопоставить. Существенным является снижение диэлектрической

проницаемости и рост угла потерь, которые удается проследить, начиная примерно от частоты 10^8 *гц* (фиг. 22). Диэлектрический гистерезис в титанате бария отчетливо выражен в широком диапазоне температур почти вплоть до точки Кюри (фиг. 23). Свойства $BaTiO_3$ в сильной степени зависят от предшествующей поляризованности керамики. Это явление было обнаружено в Физическом институте АН СССР А. В. Ржановым и получило название эффекта последействия [Л. 34]. Этот эффект состоит в том, что кривые гистерезиса имеют различный характер в зависимости от того, подвергался ли предварительно образец действию сильного поля или нет.

Исследования эффекта последействия проводились на образцах титаната бария с добавкой 2% Al_2O_3. При неизменной температуре последовательно снимались осциллограммы диэлектрического гистерезиса начиная от $E=5{,}6$ *кв/см* и до $E=25$ *кв/см*. Затем напряжение медленно понижалось до нуля и спустя 10—15 минут процесс осциллографирования повторялся снова при нарастающих значениях E (фиг. 23, *б*, *в*). Сравнение осциллограмм показывает, что при повторном воздействии поля поляризованность выше, особенно в более слабых полях порядка 5 *кв/см*. Более того, соответствующая этой напряженности кривая в форме эллипса на первой фотографии заменяется на второй характерной петлей гистерезиса. Нетрудно также заметить, что во втором случае больше гистерезисные потери, остаточный заряд, остаточная индукция, а также градиент поля.

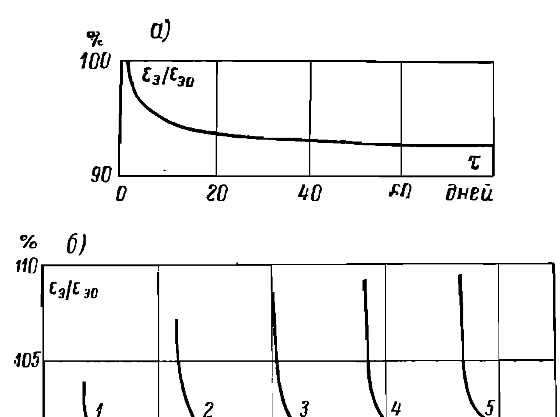
Если вершины всех петель на первичных снимках соединить плавной линией, то она будет отличаться от основной кулонвольтной кривой, построенной по вторичным снимкам гистерезисных кривых.

Зависимость свойств от предшествующего состояния (эффект последействия) по мере повышения температуры постепенно исчезает, особенно вблизи точки Кюри. Эта зависимость свойств сохраняется в течение длительного времени (при $t=20°$ C — несколько суток), тем большего, чем ниже температура. После воздействия сильного поля увеличиваются в 2—3 раза и потери, измеренные при радиочастотах, а также значение $\varepsilon_э$ (на 15%). Увеличение диэлектрической проницаемости может быть объяснено тем, что после воздействия сильного поля сегнетоэлектрик поляризуется легче, так как более „трудные" повороты электрических моментов ячеек у границ доменов уже совершены. При хранении титаната бария в комнатных условиях диэлектрическая проницаемость после изготовления образцов и нанесения электродов путем вжигания серебра начинает снижаться, стремясь к установившейся величине (фиг. 24). Путем нагревания образцов до температуры выше точки Кюри удается получить значение диэлектрической проницаемости, близкое к первоначальному. Однако при нормальной температуре снова повторяется процесс снижения $\varepsilon_э$ со временем. Если прикла-



Фиг. 23. Осциллограммы диэлектрического гистерезиса титаната бария: *а*—при различных температурах; $E = 4{,}8$ *кв/см*; $f = 60$ *гц*; *б*—до воздействия сильного поля; *в*—после воздействия; кривые снимались при возрастающих амплитудах напряжения с интервалом 10 минут

дывать сильное электрическое поле (на 10 мин.) и затем, разрядив образец (замыканием накоротко электродов на 10 сек) сразу же измерить диэлектрическую проницаемость, то она окажется выше первоначальной. Через некоторое время диэлектрическая проницаемость снижается, стремясь к исходной величине (фиг. 24, *б*). Обратимые изменения наблюдаются и для $\operatorname{tg}\delta_э$. Подобные изменения $\varepsilon_э$ и $\operatorname{tg}\delta_э$ характерны и для других систем

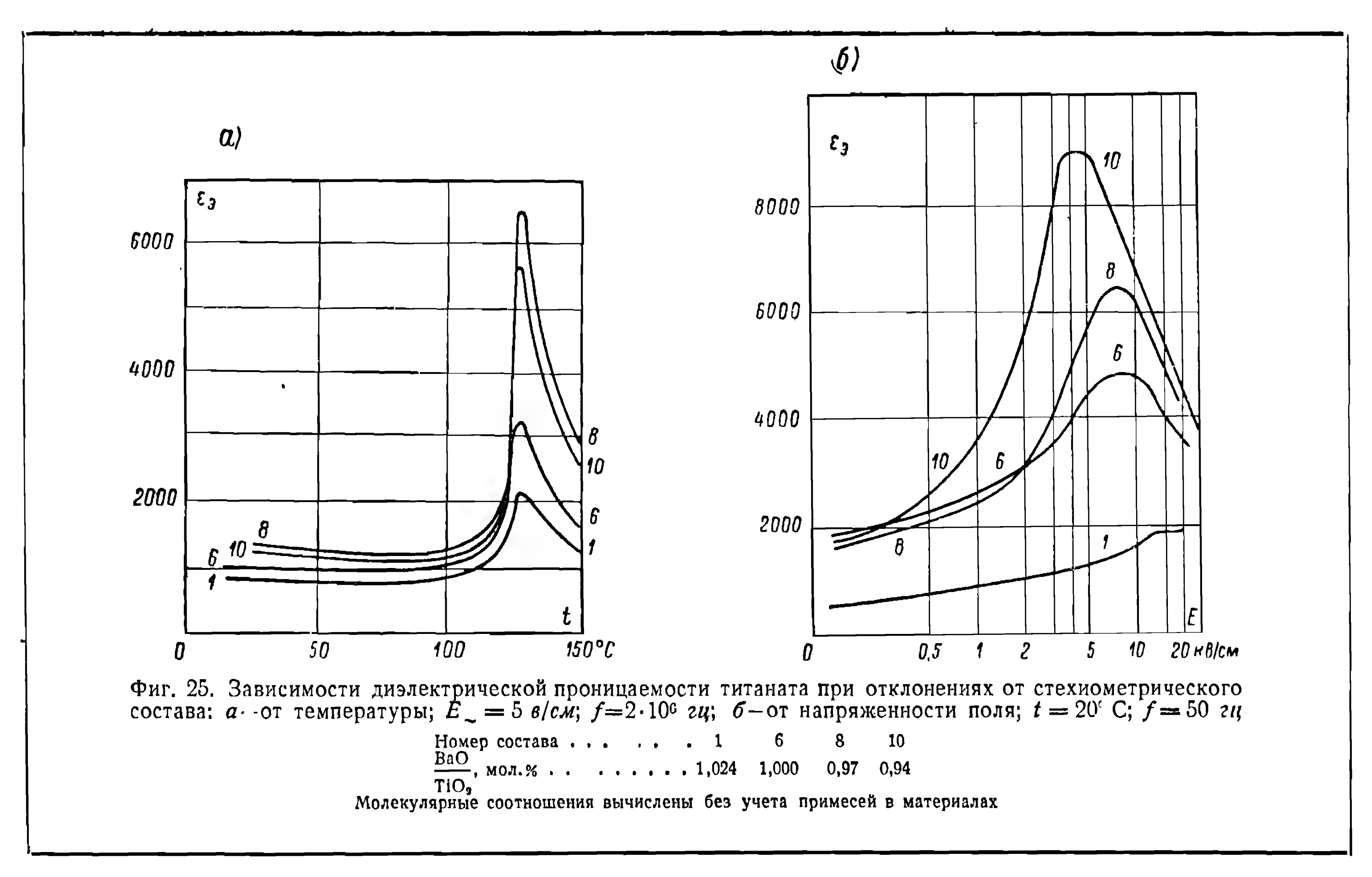


Фиг. 24. Зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария от времени: *а*—до воздействия поля; *б*—после воздействия постоянного поля различной величины; $f = 10^3$ *гц*; $E_\sim = 8 \ldots 10$ *в/мм*; $t = 18 \pm 3°$ C

1) $E_= = 0{,}3$ *кв/мм*; *2)* $E_= = 10$ *кв/см*; *3)* $E_= = 1{,}5$ *кв/см*; *4)* $E_= = 2{,}0$ *кв/см*; *5)* $E_= = 2{,}5$ *кв/см*

Существенное влияние на свойства титаната бария (так же как и на свойства других видов сегнетокерамики) оказывает отклонение от заданного молекулярного состава [Л. 45]. Это обстоятельство играет важную роль при оценке данных различных авторов. Особенно сильно меняется диэлектрическая проницаемость в районе температуры Кюри (фиг. 25); состав с избытком в 1% TiO_2 (по весу) имеет в точке Кюри наиболее высокое значение $\varepsilon_э$; можно предполагать, что избытком TiO_2 компенсируется отклонение от точного молекулярного соотношения $\frac{BaO}{TiO_2} = 1$, вызванное неучтенными примесями в сырьевых материалах.

Еще большее различие в значениях наблюдается в сильных полях (фиг. 26). Зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности поля показывает, что при избытке



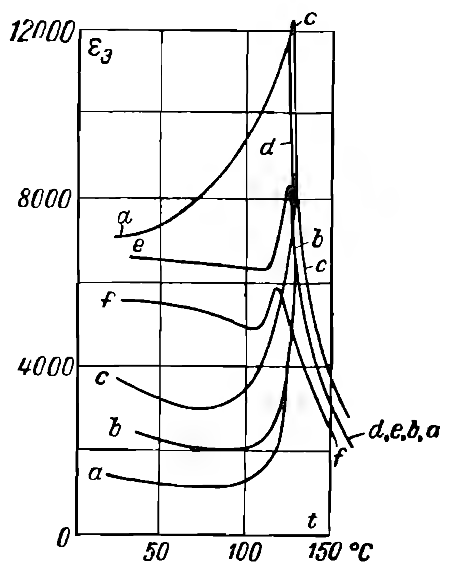
Фиг. 25. Зависимости диэлектрической проницаемости титаната при отклонениях от стехиометрического состава: *а* - от температуры; $E_{\sim} = 5$ *в/см*; $f=2\cdot10^6$ *гц*; *б* — от напряженности поля; $t = 20°$ C; $f = 50$ *гц*

Номер состава	1	6	8	10
$\frac{BaO}{TiO_2}$, мол.%	1,024	1,000	0,97	0,94

Молекулярные соотношения вычислены без учета примесей в материалах

TiO_2 максимум диэлектрической проницаемости смещается в сторону более слабых полей и растет по величине. При сравнительно небольших колебаниях состава, имеющих место, наибольшая диэлектрическая проницаемость может сильно измениться, от 9000 до 2000. При повышении температуры и при переходе за точку Кюри влияние поля практически исчезает. Ниже точки Кюри влияние поля очень заметно; наиболее высокая диэлектрическая проницаемость имеет место при напряженности $E = 5{,}5$ *кв/см* (кривая *d*); при более сильном поле значения $\varepsilon_э$ ниже.

Титанат бария, предварительно поляризованный в сильном электрическом поле, приобретает пьезоэлектрические свойства. По данным А. В. Ржанова величина пьезомодуля доходит до насыщения, и условия стабильности становятся наилучшими после подготовительной поляризации полем напряженностью 25 *кв/см* в течение часа. Если прикладывать более слабое поле, то для достижения той же начальной величины пьезомодуля требуется увеличить длительность поляризации, причем получается более низкая стабильность пьезоэффекта во времени.



Фиг. 26. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости $BaTiO_3$ состава 8 (см. фиг. 25) при различных напряженностях поля

Кривые	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*
E, *кв/см*	0,0025	0,5	1,43	5,5	10,0	14,4

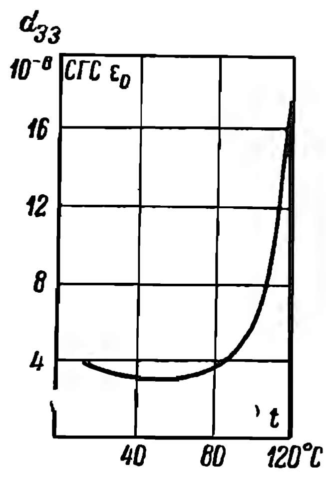
В последнее время нашел применение процесс подготовительной поляризации при температуре вблизи точки Кюри с последующим охлаждением без снятия поля; при этом может быть снижена напряженность поля.

При сжатии в направлении предшествующей поляризации статический пьезомодуль составляет

$$d_{33} = 3{,}2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{СГС}\,\varepsilon_0}{дн} = 1{,}1 \cdot 10^{-10}\ к/н.$$

При сжатии в направлении, перпендикулярном к направлению поляризации, $d_{31} = 4{,}7 \cdot 10^{-11}$ *к/н*; наибольшего значения

пьезомодуль d_{33} достигает примерно при $t = 114^\circ$ С—вблизи точки Кюри, составляя при этом $6 \cdot 10^{-10}$ *к/н*. При повышении температуры в сегнетоэлектрической области статический пьезомодуль, таким образом, возрастает. За точкой Кюри наблюдается резкий спад пьезомодуля (фиг. 27). В динамическом режиме пьезоэлектрические свойства титаната бария были изучены на длинных, тонких брусках, в которых возбуждались продольные колебания сжатия. Бруски закреплялись посередине при помощи ножевых зажимов. Динамический пьезомодуль определялся по частоте резонанса и частоте антирезонанса; для определения этих частот была использована частотная зависимость тока, идущего через образец (фиг. 28). Величина динамического пьезомодуля по данным измерений лежит в пределах



Фиг. 27. Температурная зависимость статического пьезомодуля d_{33} титаната бария

$$d_{31} = (8,3 \ldots 4,3) \cdot 10^{-11} \ к/н.$$

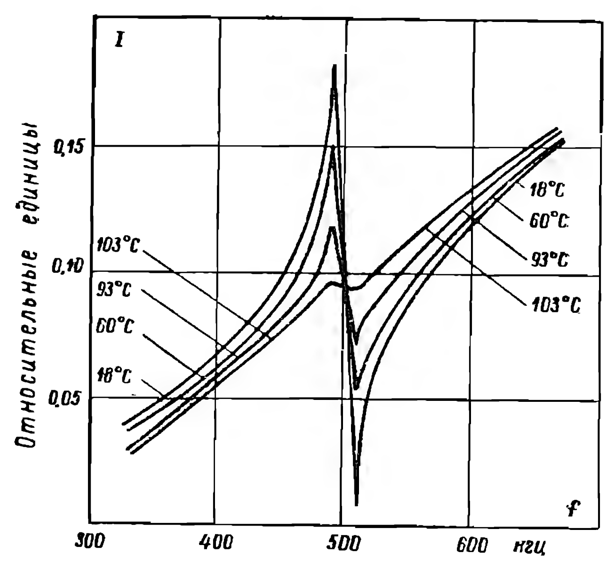
Эта величина близка к пьезомодулю кристалла титаната бария. При комнатной температуре динамический пьезомодуль для однодоменного кристалла

$$d_{31} = 10^{-10} \ к/н; \quad d_{33} = 3,14 \cdot 10^{-10} \ к/н.$$

Динамический пьезомодуль d_{31} титаната бария имеет величину того же порядка, что и пьезомодуль d_{14} сегнетовой соли и примерно на порядок больше модуля d_{33} кварца. При изменении температуры вплоть до 110° С частота резонанса и динамический пьезомодуль остаются приблизительно постоянными. При подходе к точке Кюри измерения весьма осложняются из-за трудности фиксирования частот резонанса и антирезонанса, ввиду уменьшения разницы абсолютных значений токов резонанса и антирезонанса. Это, возможно, связано с ростом потерь при увеличении температуры. Механические напряжения оказывают влияние на свойства сегнетокерамики Так при всестороннем сжатии уменьшается температура, соответствующая точке Кюри.

Существенное значение, особенно при температурах в районе точки Кюри, имеет электрострикционный эффект в титанате бария. Электрострикционные деформации, вызванные изменением размеров сегнетоэлектрика при поляризации в электрическом поле, пропорциональны квадрату электрического напряжения, тогда как обратный пьезоэффект пропорционален напряжению в первой степени. Поэтому электрострикционный эффект следует рассматривать как самостоятельное явление в дополнение к обратному пьезоэффекту.

Удельное объемное сопротивление титаната бария при постоянном токе и градиенте поля порядка 30 *в/мм*, измеренное

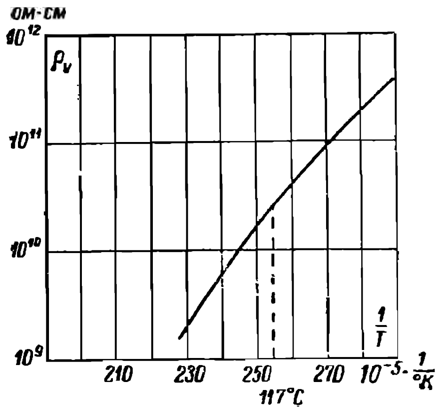


Фиг. 28. Частотные зависимости тока, наблюдаемые при исследовании пьезоэлектрических колебаний брусков титаната бария

через одну минуту: $\rho_V = 10^{12} \ldots 10^{13}$ *ом·см* [Л. 24]. Для исключения влияния влаги были проведены другие измерения удельного сопротивления, отвечающего сквозному току, при вакууме порядка $10^{-1} \ldots 10^{-2}$ *мм* рт. ст. Оказалось, что сопротивление в функции температуры подчиняется зависимости (фиг. 29):

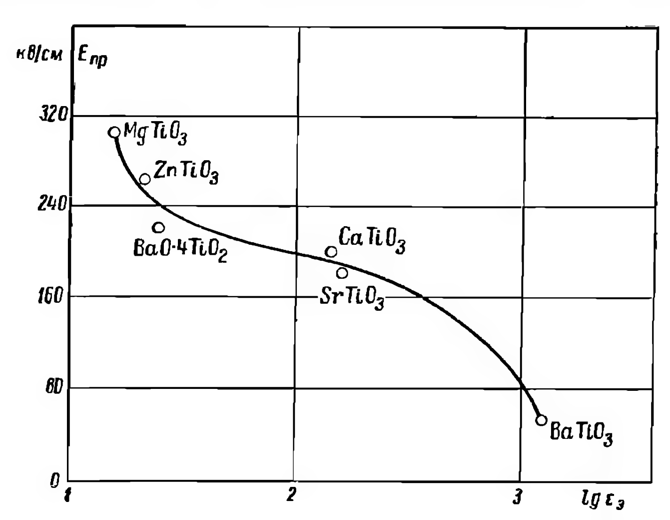
$$\rho_V = Ac^{\frac{B}{KT}}, \qquad (86)$$

где K—постоянная Больцмана, а B — энергия активации, составляющая для области ниже точки Кюри 0,65 *эв*, а для области выше точки Кюри— 0,89 *эв* ($эв = 1 \cdot 6 \cdot 10^{-12} эрг = 1{,}6 \times \times 10^{-19}$ *дж*). При температуре 100°С величина $\rho_V = 10^{11}$ *ом·см*. Удельное поверхностное сопротивление титаната бария в сильной степени зависит от состояния поверхности и влажности окружающего воздуха.



Фиг. 29. Зависимость удельного объемного сопротивления титаната бария от обратной величины абсолютной температуры (образец испытывался в вакууме)

При влажности $\varphi=65\%$ удельное поверхностное сопротивление $\rho_S=10^{11} \ldots 10^{12}$ ом. При исследовании электропроводности титаната бария наблюдается спадание тока со временем и наличие высоковольтной поляризации. Это уменьшение тока со временем могло бы быть вызвано образованием объемного заряда, формовкой и другими причинами. Исследование распределения потенциала между электродами в образце титаната бария, проведенное при различных температурах (20—260°) и при различной длительности воздействия



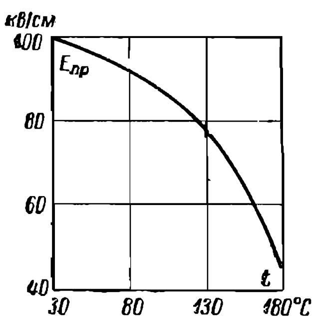
Фиг. 30. Зависимость пробивного градиента от логарифма диэлектрической проницаемости для титанатов металлов II группы; толщина образцов, имеющих лунку, в месте пробоя: 0,4... 0,6 *мм*; $f=50$ *гц*; $t=20...180°$ C

электрического поля [Л. 47], показало, что распределение потенциала остается во всех случаях линейным и не зависит от времени пребывания образца под напряжением. Это указывает на отсутствие сосредоточенного объемного заряда и процессов формовки. Спадание тока со временем, возможно, обязано местным (локальным) объемным зарядам у границ неоднородностей.

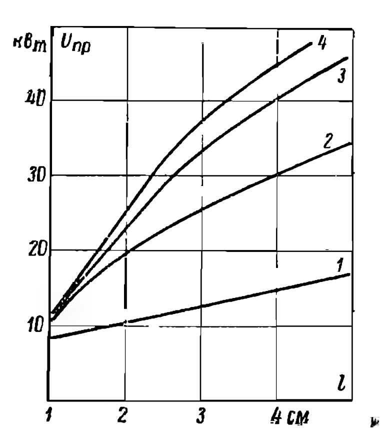
Электрическая прочность титаната бария при переменном напряжении ($f=50$ *гц*) значительно ниже, чем у других титанатов металлов II группы (фиг. 30). Пробивное напряжение зависит в первую очередь от технологии изготовления керамики; в случае плоских прессованных образцов испытания под маслом, проведенные автором, дают при толщине 0,2 ... 0,3 *см* значение пробивного градиента ($f=50$ *гц*) $E_{пр}\approx 25$ *кв/см*; в случае образцов, получаемых литьем, пробивной градиент может

возрасти до 50 *кв/см*. Последующие измерения привели примерно к тем же результатам: $E_{пр}$=36 ... 55 *кв/см* [Л. 48] Изменения величины диэлектрической проницаемости в условиях испытания при различных температурах не сказываются практически на величине $E_{пр}$.

Таким образом, низкое значение пробивного градиента титаната бария, повидимому, не связано с его высокой диэлектрической проницаемостью. Испытания, проведенные на образцах керамики более сложного состава, с t_k=—25° С, подтверждают это заключение. Данные испытания сегнетоэлектричес-



Фиг. 31. Температурная зависимость пробивного градиента для титаната бария при постоянном токе



Фиг. 32. Зависимость разрядного напряжения по поверхности керамики; толщина керамики—около 8 *мм*; f = 50 *гц*

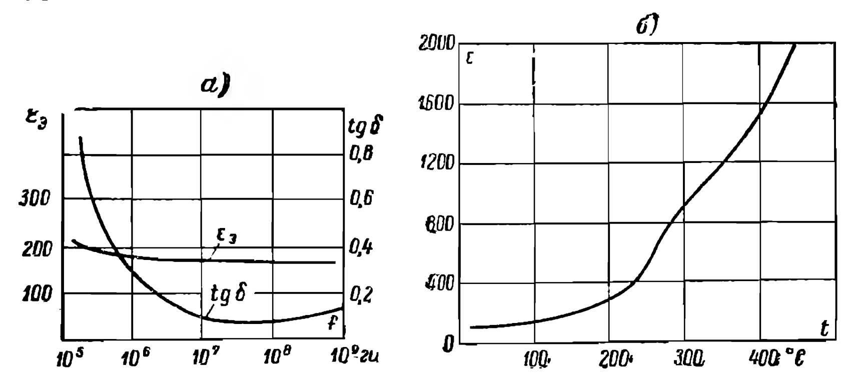
1—титанат бария с примесями; 2—тиконд; 3—радиофарфор; 4—полоски фольги в воздухе

кой ($\varepsilon_э > 1000$) и несегнетоэлектрической ($\varepsilon_э = 60$) модификации титаната бария также не позволили обнаружить заметной разницы в величине пробивного градиента. Поскольку при частоте f=50 *гц* пробивной градиент титаната бария не изменяется с повышением температуры (до 180° С), то пробой носит не тепловой характер; возможно, пробой обусловлен ионизацией газовых включений, приводящей к местным разогревам керамики и к нарушению ее электрической прочности. При постоянном напряжении пробой титаната бария имеет тепловой характер [Л. 49]; пробивная напряженность снижается с повышением температуры (фиг. 31).

Разряд по поверхности титаната бария в условиях неоднородного поля (полоски фольги на плоских образцах) происходит по данным автора при напряжениях более низких, нежели разряд по поверхности тиконда и радиофаратора (фиг. 32). Это следует объяснить в первую очередь тем, что степень неоднородности поля у края электрода возрастает при увеличении диэлектрической проницаемости керамики.

14. Титанат свинца

Титанат свинца является сегнетоэлектриком с точкой Кюри около 500° С. Титанат свинца при высоких температурах химически неустойчив, поэтому в обычных условиях спекшиеся образцы получить трудно; приходится применять ряд мер для обеспечения в керамике после обжига нужного молекулярного соотношения. Рентгеноструктурные исследования титаната свинца проводились на образцах, обжигавшихся при температуре $t=1100°$ С. Эти исследования показали, что кристалл при



Фиг. 33.

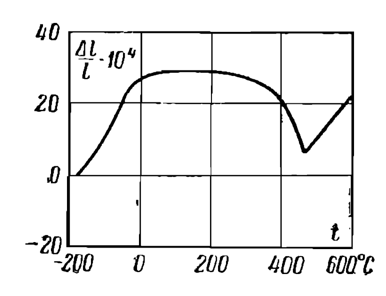
а—Частотные зависимости $\varepsilon_э$ и $tg\,\delta_э$ для $PbTiO_3$ (монокристалл) в слабых полях; *б*—температурная зависимость $\varepsilon_э$ титаната свинца (поликристалл); f—10^6 *гц*; $E=10..20$ *в/см*

температуре $t=+35°$ С имеет тетрагональную структуру с параметрами решетки $a=3{,}896\cdot10^{-8}$ *см*, $c=4{,}144\cdot10^{-8}$ *см* $\left(\frac{c}{a}=1{,}0635\right)$; при температуре 530° С—структура кубическая ($a=3{,}96\cdot10^{-8}$ *см*) [Л. 50]; точка Кюри соответствует температуре $t=490°$ С, по другим данным при $t=507°$ С. Однако эти данные, полученные для поликристаллических образцов, не являются достаточно точными ввиду трудностей получения чистого спекшегося $PbTiO_3$ из-за его способности к разложению уже при $t=1200°$ С. Для монокристалла $PbTiO_3$ оказалось, что диэлектрическая проницаемость возрастает с ростом температуры [Л. 51] и при нормальной температуре составляет около 170, что несколько выше значения, найденного для поликристаллического образца (см. ниже). Ввиду высокой электропроводности ($\rho_V=10^7 \ldots 10^8$ *ом·см*) измерения проводились на высоких частотах при температуре не выше 400° С. Тангенс угла потерь с ростом частоты сильно падает (фиг. 33, *а*); при повышении температуры до 100° потери возрастают в 5 раз по сравнению с потерями при нормальной температуре. Диэлектрическая проницаемость слабо зависит от частоты.

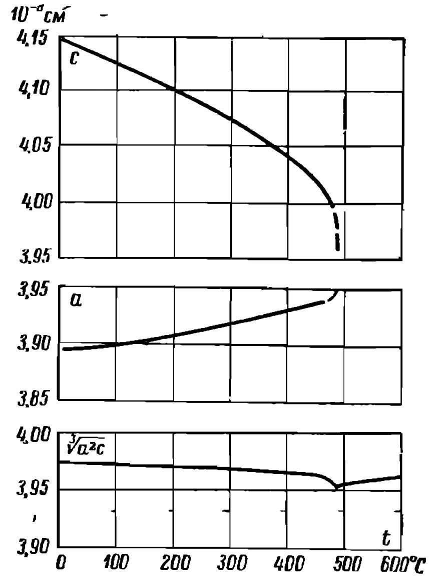
Свойства титаната свинца изучались также на слегка пористых поликристаллических образцах; устранить пористость в условиях опыта путем повышения температуры обжига не удалось из-за нестабильности титаната свинца при высоких температурах, порядка 1200° С.

Температурную зависимость диэлектрической проницаемости титаната свинца вначале удалось изучить только до 500° С, так как возрастание электропроводности при высоких температурах сильно осложняет измерение емкости; значения $\varepsilon_э$ найдены путем вычислений с учетом пористости образцов.

Снятая несколько позднее на хорошо спекшихся образцах температурная зависимость диэлектрической проницаемости



Фиг. 34. Температурная зависимость относительного удлинения образца титаната свинца (диаметр 5 *мм*, длина 50 *мм*)



Фиг. 35. Температурная зависимость c, a и $\sqrt[3]{a^2c}$ кристаллической решетки $PbTiO_3$

позволила установить, что точка Кюри отвечает температуре +512° С [Л. 14]. Диэлектрическая проницаемость в точке Кюри достигает 3500; при комнатной температуре это соединение, подобно титанату бария, имеет тетрагональную кристаллическую решетку; исследование температурной зависимости удлинения титаната свинца (фиг. 34) показывает, что объем образца возрастает в интервале от —200 до —30° С, но по мере повышения температуры и ее приближения к точке Кюри объем уменьшается. Это происходит вследствие уменьшения спонтанной поляризации и связанной с ней спонтанной объемной электрострикции, несмотря на тепловое расширение вещества. Объем кристалла с нагреванием не растет, а медленно убывает до точки Кюри; после перехода через эту точку объем начинает возрастать (фиг. 35). Физическое расширение с нагревом, свойственное всем телам, меньше, чем сжатие, связанное с убыванием спонтанной поляризации. Фазовый переход имеет

такую же форму, как и в $BaTiO_3$, но является более крутым. В интервале от —170 до +550° С имеется только один фазовый переход, тогда как в $BaTiO_3$ — три перехода.

Таким образом титанат свинца обладает положительной объемной электрострикцией в интервале температур от —30° С до +490° С.

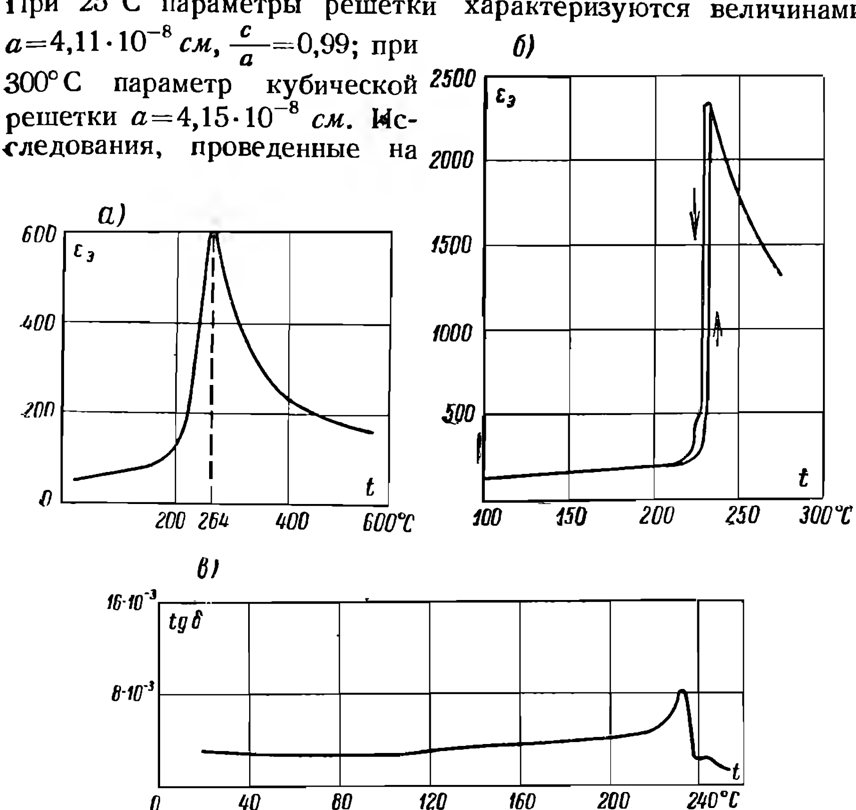
15. Цирконат свинца

Цирконат свинца имеет при температуре ниже точки Кюри кристаллическую решетку типа перовскита, форма которой при комнатной температуре тетрагональная. Спекшуюся керамику этого типа получить трудно, и поэтому диэлектрическая проницаемость в некоторых случаях вычисляется с учетом пористости образцов [Л. 53]. Температурная зависимость $\varepsilon_э$ показывает, что температура, отвечающая максимуму диэлектрической проницаемости, составляет 264° С (фиг. 36, *а*); в последующем уточненные исследования показали, что точка Кюри отвечает температуре около 235° С. Сегнетоэлектрические свойства наблюдаются в определенном интервале температур (для большинства составов при $t > 200°$ С) и при сравнительно сильных полях.

Спекшиеся образцы цирконата свинца получают путем обжига смеси двуокиси циркония и окиси свинца в атмосфере, содержащей пары окиси свинца, при определенном давлении для предотвращения изменения соотношения ZrO_2 и PbO в керамике из-за испарения PbO при высокой температуре. Образцы цирконата свинца изготовлялись из чистой двуокиси циркония и окиси свинца; для реактивов соотношение между ZrO_2 и PbO (молекулярное) составляло 1 : 1. Отвешенные в этом соотношении компоненты смешивались с добавкой воды и после сушки и пропускания через сито 50 меш (~№ 0355) порошок обжигался в закрытых керамических тиглях при температуре $t=$ $=1050°$С с часовой выдержкой. Обожженная смесь подвергается помолу до прохождения без остатка через сито 325 меш (~№0045). После легкого увлажнения порошка из него прессовались образцы в виде дисков, которые после сушки обжигались при температуре до 1400° С в воздушной среде с парами свинца. Давление паров PbO при температуре обжига должно соответствовать количеству окиси свинца в шихте; благодаря этому улетучивалось при обжиге небольшое количество PbO, не более 2,5% по весу. Таким образом, изготовление велось в две стадии: в начале обжигалась смесь для получения цирконата бария, а затем из нее готовились образцы, обжигавшиеся при более высокой температуре. Электроды на образцы наносились путем вжигания серебра при температуре $t=480°$ С. Исследование этих образцов показало, что температурная зависимость диэлектрической проницаемости переходит через максимум; диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_э=3260$ при темпе-

ратуре 236° С — в случае нагревания и $\varepsilon_э=3480$ при $t=232°$ С — в случае охлаждения от 350° С; в этом интервале совершается фазовый переход от кубической структуры к псевдотетрагональной [Л. 53].

Температурная зависимость $\mathrm{tg}\,\delta$ представлена на фиг. 36, *б*. При 25° С параметры решетки характеризуются величинами $a=4{,}11\cdot10^{-8}$ *см*, $\frac{c}{a}=0{,}99$; при 300° С параметр кубической решетки $a=4{,}15\cdot10^{-8}$ *см*. Исследования, проведенные на

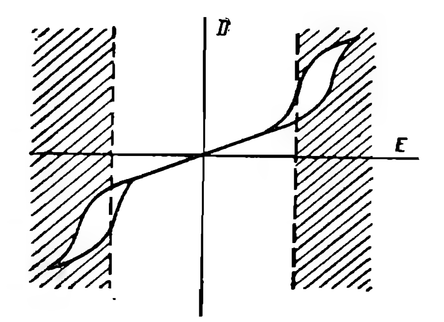


Фиг. 36. Температурные зависимости для цирконата свинца: *а*—диэлектрической проницаемости $\varepsilon_э$, найденной с учетом пористости образцов; *б*—диэлектрической проницаемости $\varepsilon_э$ (спекшиеся образцы); *в*—тангенса угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\,\delta_э$; $f=10^6$ *гц*; слабое поле

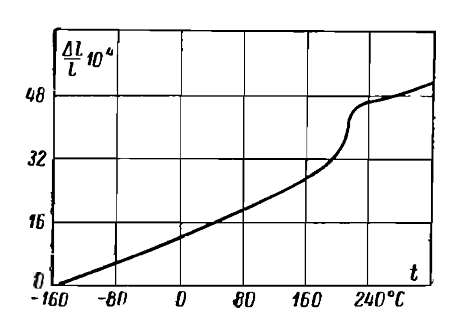
образцах $PbZrO_3$, изготовленных из сырья с небольшими примесями (Ti—0,21%, Fe—0,05% и Si—0,03%) и спекавшихся при $t=1250°$ С по двухстадийному процессу, показали, что точка Кюри отвечает температуре 233° С; диэлектрическая проницаемость в этой точке имеет значение ~2300 [Л. 55]. По данным Г. А. Смоленского диэлектрическая проницаемость в точке Кюри достигает 3600. Если накладывать постоянное поле с напряженностью до 20 *кв/см*, то ниже точки Кюри уменьшение реверсивной диэлектрической проницаемости с ростом

напряженности $E_=$ не наблюдается; это уменьшение можно заметить лишь при $t > t_к$. Точка Кюри под действием постоянного поля не смещается. При температуре 20° С влияние накладываемого постоянного поля ($E \leqslant 20$ *кв/см*) не обнаруживается.

Эти результаты не согласуются с опытными данными, полученными для $BaTiO_3$ и других сегнетоэлектриков, в которых под действием возрастающего постоянного поля падает реверсивная диэлектрическая проницаемость, а температура, отвечающая точке Кюри, повышается. Оказалось также, что диэлектрический гистерезис при напряженности $E \leqslant 20$ *кв/см* при



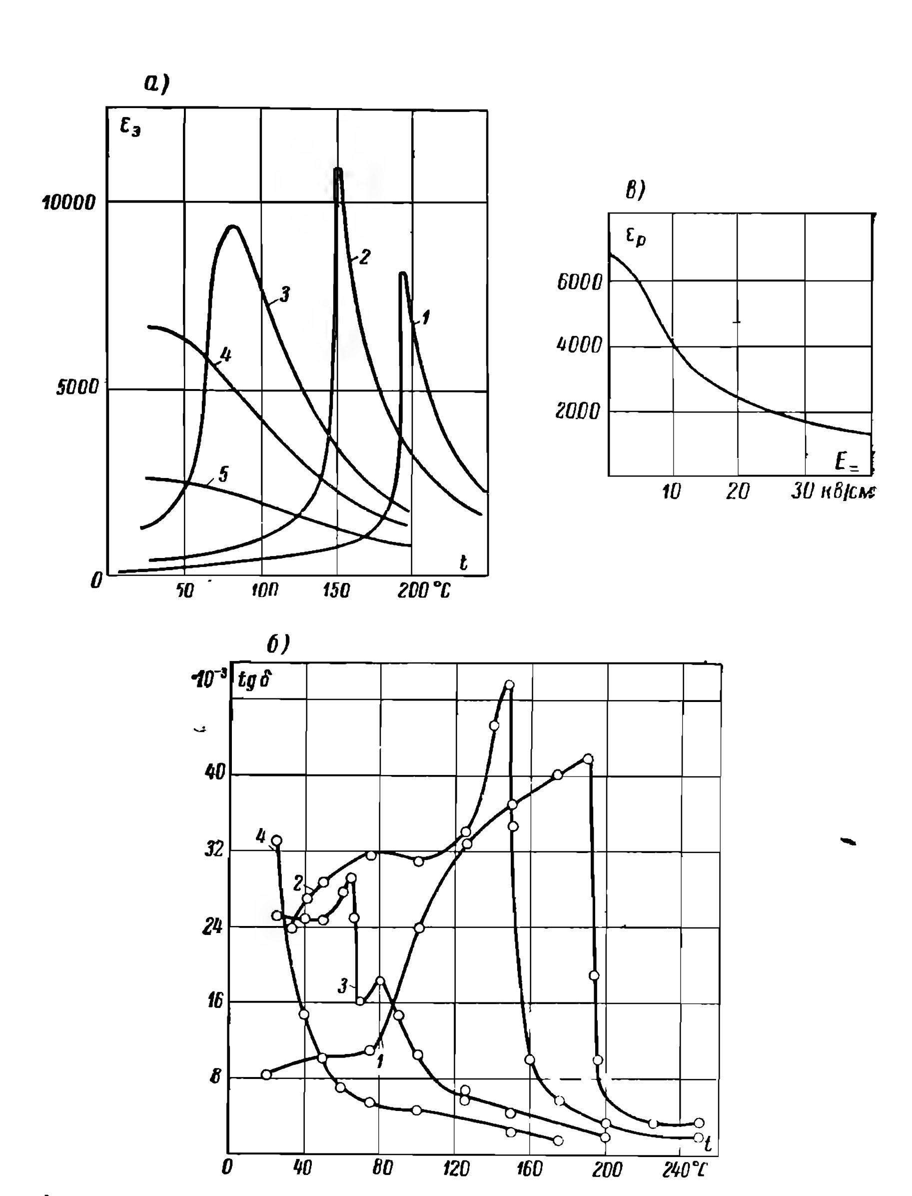
Фиг. 37. Форма гистерезисной кривой при сильном поле для $PbZrO_3$; $E_m = 30$ *кв/см*; заштрихованы области, в которых наблюдается гистерезис



Фиг. 38. Температурная зависимость удлинения образца цирконата свинца

температурах от 20 до 200° С не наблюдается. Диэлектрический гистерезис в цирконате свинца появляется при температурах свыше 220° С при градиентах порядка 20 *кв/см* и больше. Однако при определенных значениях градиента и температуры, петли гистерезиса могут иметь форму, характерную для антисегнетоэлектриков (фиг. 37). При повышении напряжения и приближении температуры к точке Кюри петли могут принимать форму, обычную для сегнетоэлектриков. Искажение формы кривых гистерезиса, вероятно, обусловлено антипараллельным расположением электрических моментов доменов при указанных выше условиях.

На основании зависимости удлинения от температуры (фиг. 38) можно сделать вывод о наличии двух близко расположенных фазовых переходов: при более низких температурах имеет место первый фазовый переход с отрицательной объемной электрострикцией, а при более высокой температуре— фазовый переход с положительной объемной электрострикцией. При повышении температуры объем образца вплоть до температуры первого фазового перехода возрастает, следовательно, в широком интервале температур, т. е. до значений $t = 220$° С,



Фиг. 39. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости (*а*) и тангенса угла потерь (*б*) в слабых полях для системы $BaZrO_3$—$PbZrO_3$; $f = 10^6$ *гц*; *в*—зависимость реверсивной диэлектрической проницаемости для системы $(Ba_{0,35}, Pb_{0,65}ZrO_3)$ от напряженности поля; $t = 27°$ С, $f = 6{,}5 \cdot 10^5$ *гц*

Кривые	Формула
1	$(Ba_{0,1}\ Pb_{0,9})\ ZrO_3$
2	$(Ba_{0,2}\ Pb_{0,8})\ ZrO_3$
3	$(Ba_{0,3}\ Pb_{0,7})\ ZrO_3$
4	$(Ba_{0,35}\ Pb_{0,65})\ ZrO_3$
5	$(Ba_{0,4}\ Pb_{0,6})\ ZrO_3$

цирконат свинца обладает отрицательной объемной электрострикцией. Отношение осей $\frac{c}{a}$ кристалла для псевдотетрагональной структуры $PbZrO_3$ составляет 0,99, тогда как для титаната бария это отношение равнялось 1,01. В титанате бария при переходе в сегнетоэлектрическую область кристалл в одном направлении (ось z) увеличивается, в двух других — сжимается, что согласуется с представлением о смещении иона титана и одного из ионов кислорода навстречу друг другу; размеры кристалла цирконата свинца вдоль двух осей увеличиваются, а вдоль одной — уменьшаются; поэтому надо полагать, что изменения, происходящие в решетке $PbZrO_3$, имеют более сложный характер.

Использование $PbZrO_3$ в системе твердых растворов с сегнетокерамическими материалами, обладающими положительной объемной электрострикцией, открывает возможность получения сегнетокерамики с малой объемной электрострикцией. Наличие малых электрострикционных напряжений является предпосылкой получения высокой диэлектрической проницаемости и нелинейности.

16. Твердые растворы цирконата бария в цирконате свинца

Поликристаллические образцы системы $BaZrO_3$—$PbZrO_3$ изготовлялись из чистой окиси циркония, окиси свинца для реактивов и углекислого бария. Отвешенные в нужном молекулярном соотношении компоненты смешивались с добавкой воды; полученный после удаления воды корж подвергался измельчению, порошок пропускался через сито 50 меш (№ 0355); первый обжиг производился в закрытых платиновых тиглях при $t=1050°C$ с часовой выдержкой; обожженный череп („спек“) измельчался в шаровой мельнице до прохождения через сито 325 меш (~№ 0045). Из слегка увлажненного порошка получали прессовкой диски 3×12 *мм*. После сушки образцы вторично обжигались при температуре 1300—1400° С в воздушной среде с преобладанием паров окиси свинца, причем давление паров при температуре обжига отвечало количеству окиси свинца в керамике. Для этой цели платиновый тигель с крышкой, содержащий обжигаемые изделия, вставлялся в другой тигель, в котором находилась окись свинца. Этим предупреждалось улетучивание окиси свинца из материала. Количество PbO все же уменьшалось в течение обжига, но не более чем на 2,5% по весу [Л. 54]. Вжигание серебра производилось при температуре 480° С. Таким образом, приготовление образцов происходило по двухстадийному процессу. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости $\varepsilon_э$ (фиг. 39, *а*), снятые на этих образцах, показывают, что максимум $\varepsilon_э$ в точке Кюри смещается к более низким температурам с возрастанием

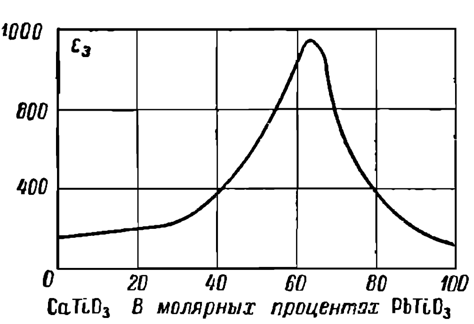
в растворе $BaZrO_3$. Интересно отметить, что для системы ($Ba_{0,3}$, $Pb_{0,7}$) ZrO_3, как и других растворов этой системы с еще большим содержанием $BaZrO_3$, спадание $\varepsilon_э$ за точкой Кюри идет медленно и диэлектрическая проницаемость сохраняет большое значение в широком диапазоне температур. Материалы этой системы довольно чувствительны к воздействию постоянного поля. Реверсивная диэлектрическая проницаемость для одного из образцов изменяется примерно в 6 раз при увеличении напряженности $E_=$ до 40 *кв/см* (фиг. 39, *в*).

Пьезоэлектрические свойства изучались на образце, который предварительно поляризовался в постоянном поле с градиентом $E_= = 30$ *кв/см* в течение 30 мин. Для системы ($Ba_{0,3}$ $Pb_{0,7}$) ZrO_3, пьезомодуль d_{33}, измеренный через несколько часов после поляризации, составил $6{,}5 \cdot 10^{-11} \frac{\text{кулон}}{\text{ньютон}}$, что меньше аналогичной величины для титаната бария ($1{,}5 \cdot 10^{-10}$ *к/н*).

Хотя цирконат бария не является сам сегнетоэлектриком, однако, комбинируя его с цирконатом свинца, получают материалы, иногда превосходящие в отношении некоторых свойств титанат бария. Приготовление этой керамики отличается сложностью ввиду необходимости поддерживать в печи при обжиге повышенное давление газообразной окиси свинца.

17. Твердые растворы титаната кальция в титанате свинца

Изготовление поликристаллических образцов производилось таким же путем как и при изучении системы TiO_2—PbO.



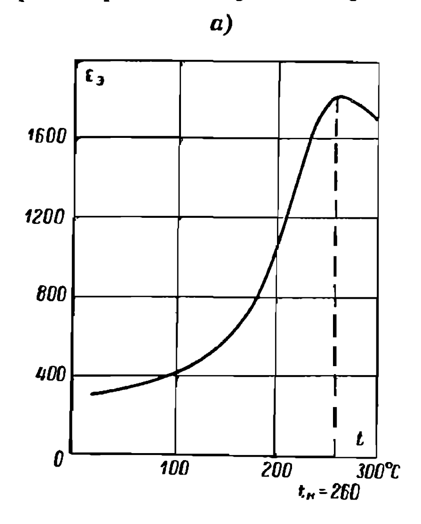
Фиг. 40. Зависимость диэлектрической проницаемости взаимных твердых растворов $CaTiO_3$ — $PbTiO_3$ от содержания $PbTiO_3$; $t = 20°$; $f = 10^6$ *гц*; $E = 10...20$ *в/см*

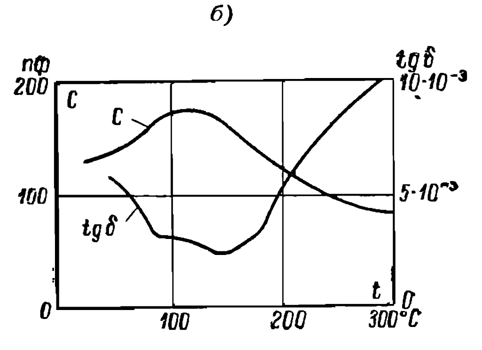
Зависимость диэлектрической проницаемости от состава (фиг. 40) показывает, что диэлектрическая проницаемость при нормальной температуре достигает наибольшего значения при концентрации около 65% $PbTiO_3$ [Л. 14]. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости для образца с соотношением $\frac{CaTiO_3}{PbTiO_3} = \frac{20}{80}$ имеет максимум в точке Кюри при температуре $t_к = 260°$ С (фиг. 41). Для системы с соотношением $\frac{CaTiO_3}{PbTiO_3} = \frac{30}{70}$ максимум диэлектрической проницаемости имеет место при температуре около 120° С. Минимальное значение

$tg\,\delta_э$ имеет место при температуре 150°С ($tg\,\delta_э \approx 2 \cdot 10^{-3}$ при частоте $f = 10^6$ *гц* в слабом поле); при более низких, как и при более высоких температурах, значение $tg\,\delta_э$ выше. Осциллограммы зависимости $q(u)$ показывают, что при известных температурах наблюдается диэлектрический гистерезис.

18. Твердые растворы титаната стронция в титанате свинца

Поликристаллические образцы изготовлялись по двухстадийному процессу. В системе образуются взаимные твердые растворы $PbTiO_3$—$SrTiO_3$, обладающие сегнетоэлектрическими свойствами. Зависимость диэлектрической проницаемости от состава (фиг. 42) имеет максимум при концентрации около 45% $PbTiO_3$ [Л. 14]. Точка Кюри для





Фиг. 41.

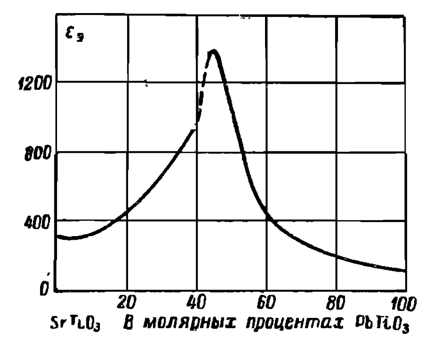
а—Температурная зависимость $\varepsilon_э$ системы $\frac{CaTiO_3}{PbTiO_3} = \frac{20}{80}$; *б* — температурные зависимости емкости и $tg\,\delta$ образца системы $\frac{CaTiO_3}{PbTiO_3} = \frac{30}{70}$; $f = 10^6$ *гц*; $E = 10...20$ *в/см*

системы с соотношением $\frac{PbTiO_3}{SrTiO_3} = \frac{60}{40}$ имеет место при температуре $t = 250°$ С, а для системы с соотношением $\frac{PbTiO_3}{SrTiO_3} = \frac{70}{30}$ — при температуре 320°С (фиг. 43). Осциллографические испытания позволили обнаружить наличие диэлектрического гистерезиса в некотором диапазоне температур.

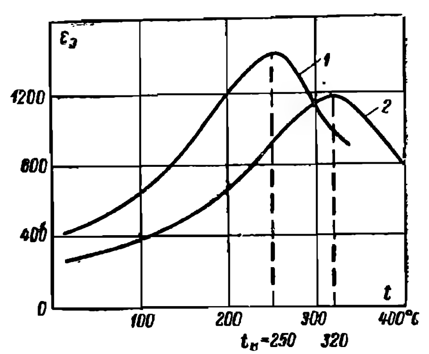
19. Твердые растворы оловината бария в титанате бария

При содержании до 15% (мол.) $BaSnO_3$ рассматриваемые твердые растворы были исследованы автором в 1946 г. Поликристаллические образцы изготовлялись по двухстадийному

процессу. При увеличении процентного содержания оловината бария—$BaSnO_3$ точка Кюри смещается в сторону отрицательных температур, причем диэлектрическая проницаемость может намного превосходить значения $\varepsilon_э$ для титаната бария, а



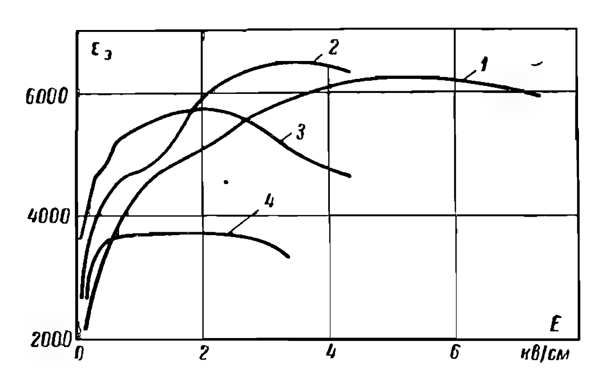
Фиг. 42. Зависимость диэлектрической проницаемости взаимных твердых растворов $SrTiO_3$—$PbTiO_3$ от содержания $PbTiO_3$; $t = 20°$ C; $f = 10^6$ *гц*; $E = 10...20$ *в/см*



Фиг. 43. Температурные зависимости $\varepsilon_э$

1—система $\frac{SrTiO_3}{PbTiO_3} = \frac{40}{60}$; *2*—система $\frac{SrTiO_3}{PbTiO_3} = \frac{30}{70}$; $f = 10^6$ *гц*; $E = 10...20$ *в/см*

потери могут иметь более низкие значения. При температурах ниже точки Кюри вблизи нее ярко выражена градиентная зависимость диэлектрической проницаемости; изменение $\varepsilon_э$

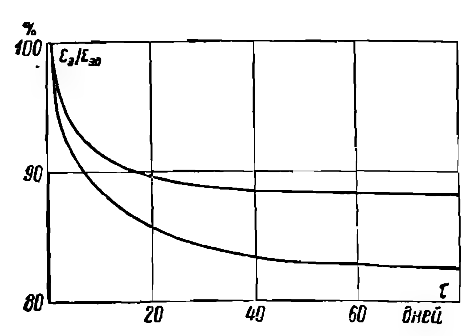


Фиг. 44. Зависимости диэлектрической проницаемости для одного из взаимных растворов $BaTiO_3$—$BaSnO_3$ от напряженности поля; $f = 10^3$ *гц*

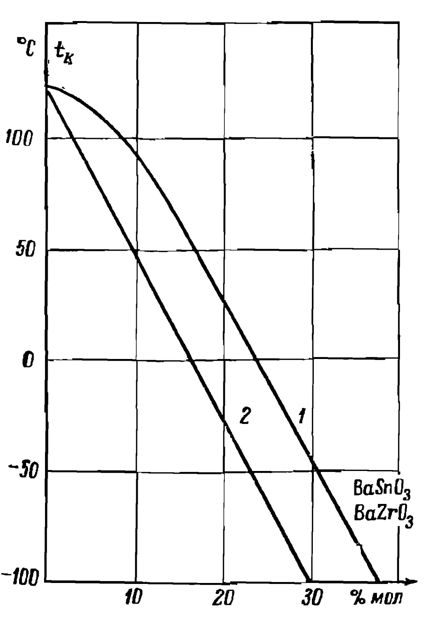
1—при 20° С; *2*—при 40° С; *3*—при 60° С; *4*—при 80° С

наблюдается уже в слабых полях (фиг. 44). При некоторых температурах диэлектрическая проницаемость весьма резко увеличивается при нарастании поля; таким образом, при этих условиях имеет место высокая эффективная нелинейность ке-

рамики. Осциллографические испытания показали наличие узкой петли гистерезиса при температурах ниже точки Кюри и вблизи нее и высокой дифференциальной нелинейности и нелинейности насыщения. При понижении температуры нелинейность несколько уменьшается, одновременно растут потери, увеличивается коэрцитивный градиент поля. Высокая диэлектрическая проницаемость и резкая градиентная зависимость вблизи точки Кюри связаны с тем, что, повидимому, объемная электрострикция таких взаимных твердых растворов невелика. Обратимые временные изменения диэлектрической проницаемости во взаимных растворах при содержании до 12% $BaSnO_3$ довольно значительны и превосходят изменения $\varepsilon_э$ для тита-



Фиг. 45. Зависимости диэлектрической проницаемости от времени для двух взаимных твердых растворов $BaTiO_3 - BaSnO_3$; $f = 10^3$ *гц*; $E = 10$ *в/мм*; $t = 18...20°$ C



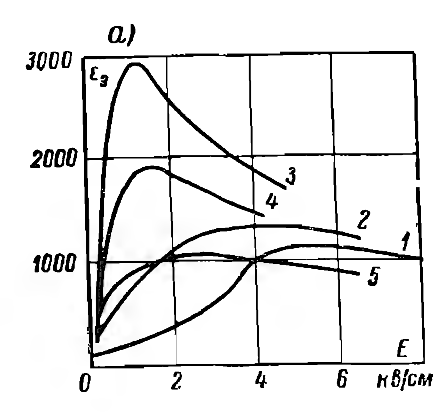
Фиг. 46. Зависимость температуры фазового перехода от концентрации $BaZrO_3$ или $BaSnO_3$ в их твердых растворах с титанатом бария *1*) $BaZrO_3$—$BaTiO_3$; *2*) $BaSnO_3$

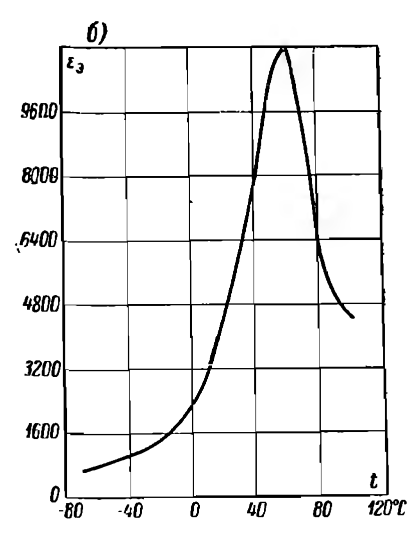
ната бария (фиг. 45). Проведенные позднее исследования охватили более широкий диапазон концентраций $BaSnO_3$ до 30 мол. % [Л. 56]. Зависимость температуры фазового перехода от концентрации $BaSnO_3$ дана на фиг. 46.

Измерения, проведенные на образцах керамики с десятипроцентным (молекулярным) содержанием $BaSnO_3$, подтвердили наличие более высокой диэлектрической проницаемости (фиг. 47) и более резкой градиентной зависимости диэлектрической проницаемости в точке Кюри и вблизи нее, чем у титаната бария. При одной и той же приведенной температуре $\frac{t}{t_к} = 0,87$ диэлектрическая проницаемость титаната бария достигает наибольшего значения ($\varepsilon_э \approx 9500$) при градиенте 5 *кв/см*,

а в керамике с 10% $BaSnO_3$ $\varepsilon_э$=30 000 при градиенте около 1 *кв/см*. Таким образом, при содержании оловината бария до 30 мол. %, не являющегося сегнетоэлектриком, эта керамика не только сохраняет сегнетоэлектрические свойства, но и чрезвычайно легко поляризуется, особенно при соотношении $\frac{BaSnO_3}{BaTiO_3}$, близком к 10 : 90.

При более высоком содержании $BaSnO_3$ (свыше 20 мол. %) диэлектрическая проницаемость невелика и слабо меняется с изменением температуры, что можно объяснить своеобразной неоднородностью строения; полагают, что материал состоит из





Фиг. 47.

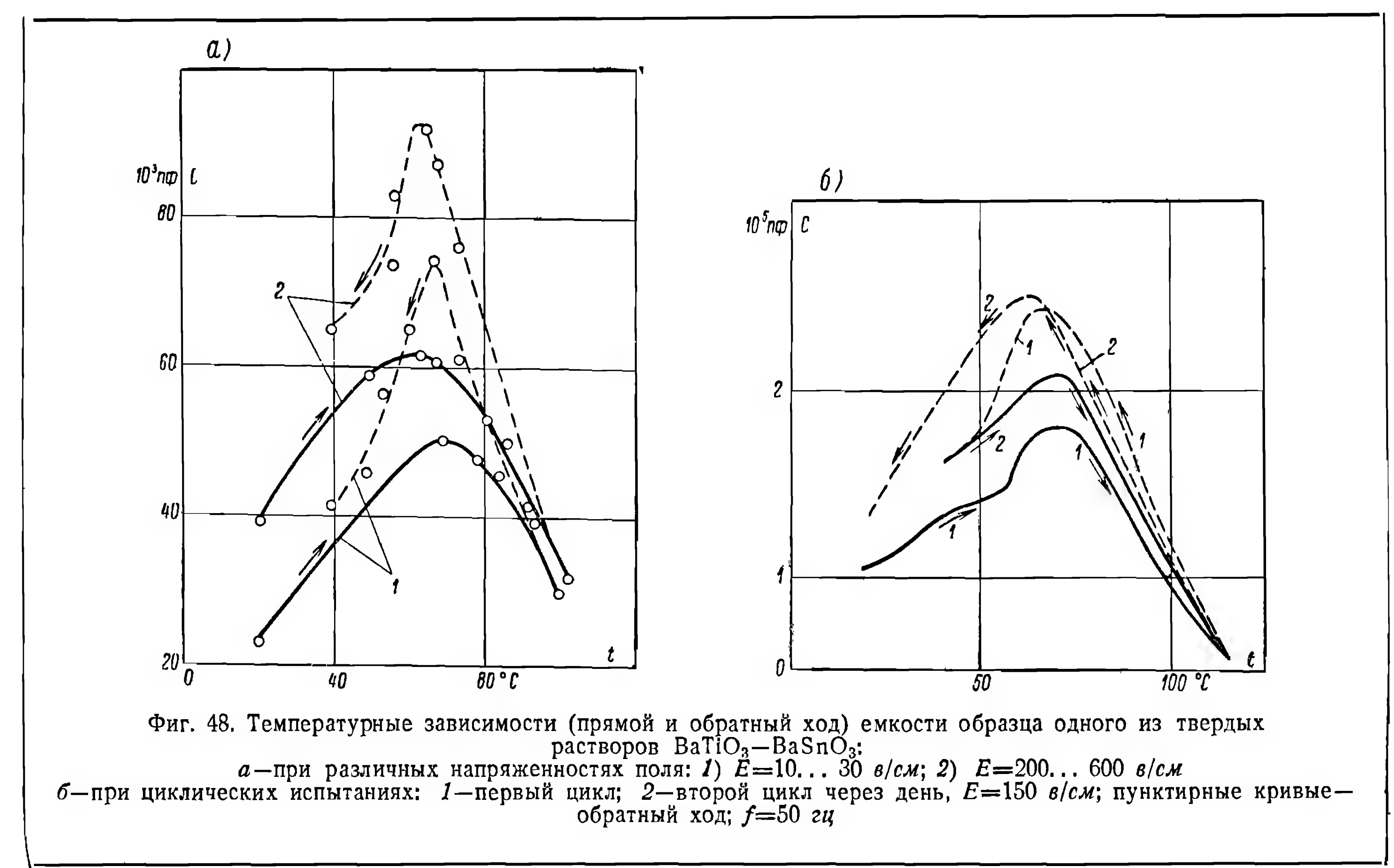
а—Зависимости диэлектрической проницаемости (0,1 $\varepsilon_э$) твердых растворов $BaTiO_3$—$BaSnO_3$ от напряженности поля при температуре $t = 0{,}87 t_к$; $f = 50$ *гц*

Кривые	1	2	3	4	5
$\frac{BaTiO_3}{BaSnO_3}$, мол.%	$\frac{100}{0}$	$\frac{95}{5}$	$\frac{90}{10}$	$\frac{85}{15}$	$\frac{75}{25}$

б—температурная зависимость диэлектрической проницаемости $\varepsilon_э$ в слабом поле для системы $\frac{BaSnO_3}{BaTiO_3} = \frac{10}{90}$; $f = 10^3$ *гц*

ряда сегнетоэлектриков с различными точками Кюри, захватывающими значительную температурную область.

Весьма сильно сказываются воздействия температуры и поля, вызывающие обратимые изменения диэлектрической проницаемости и угла потерь. По данным измерений авторов, Е. Гинзбурга и В. Смирнова, температурная зависимость емкости образца при прямом ходе (повышение температуры) проходит ниже, чем при обратном (фиг. 48), причем с повышением градиента кривая приподнимается над осью абсцисс. По окончании измерений емкость оказывается выше, чем до снятия



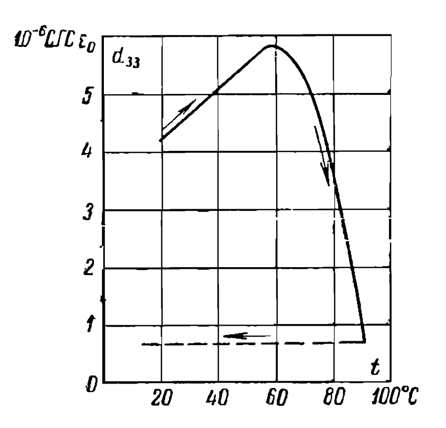
Фиг. 48. Температурные зависимости (прямой и обратный ход) емкости образца одного из твердых растворов $BaTiO_3-BaSnO_3$:

а—при различных напряженностях поля: *1*) $E=10...30$ *в/см*; *2*) $E=200...600$ *в/см*

б—при циклических испытаниях: *1*—первый цикл; *2*—второй цикл через день, $E=150$ *в/см*; пунктирные кривые—обратный ход; $f=50$ *гц*

кривой; это можно проследить и при циклических испытаниях. В сильных полях температурная зависимость диэлектрической проницаемости характеризуется тупым максимумом, сдвинутым в сторону отрицательных температур. Введение небольшого избыточного количества двуокиси олова позволяет повысить нелинейные свойства керамики.

Керамика обладает пьезоэлектрическими свойствами, причем эти свойства имеют место не только в сегнетоэлектрической области, но и за точкой Кюри (фиг. 49). При нормальной температуре статический пьезомодуль имеет величину $d_{33}=1{,}3\cdot10^{-10}$ *к/н*. Даже после нагрева до 90° С и охлаждения пьезоэлектрические свойства сохраняются, правда, на более низком уровне.



Фиг. 49. Температурная зависимость статического пьезомодуля d_{33} для взаимного раствора $\frac{BaSnO_3}{BaTiO_3}=\frac{1}{9}$; предварительная поляризация—в течение часа при градиенте $E=10$ *кв/см*; сила $F=10$ *кГ*

20. Твердые растворы цирконата бария в титанате бария

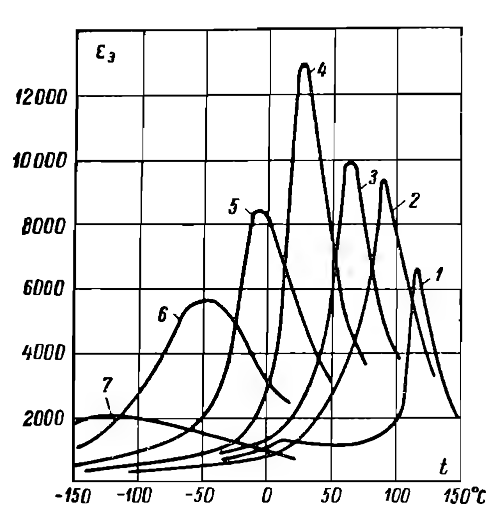
Существенное отличие этих растворов состоит в том, что в сегнетоэлектрической области при определенных концентрациях компонентов в пределах домена происходит, как полагают, колебательное смещение в направлении спонтанной поляризации не только иона Ti^{4+}, но и иона Zr^{4+}. Электрострикционные напряжения, обусловленные этими смещениями, могут быть достаточно малы; поэтому при определенном соотношении $BaTiO_3 : BaZrO_3$ общая объемная электрострикция также мала. Если керамика характеризуется малой электрострикцией, то ее диэлектрическая проницаемость, как уже указывалось, может значительно превышать в точке Кюри диэлектрическую проницаемость титаната бария.

Одновременно при увеличении концентрации $BaZrO_3$ происходит смещение точки Кюри в сторону более низких температур (фиг. 50) [Л. 57].

Объемная электрострикция при соотношении $\frac{BaTiO_3}{BaZrO_3}=\frac{80}{20}$ невелика и в связи с этим диэлектрическая проницаемость высока в точке Кюри ($\varepsilon_э=13\,000$). Знак объемной электрострикции можно определить по температурной зависимости коэффициента линейного расширения; этот знак положителен, если

в точке Кюри указанная температурная зависимость имеет минимум (кривая 1, фиг. 51).

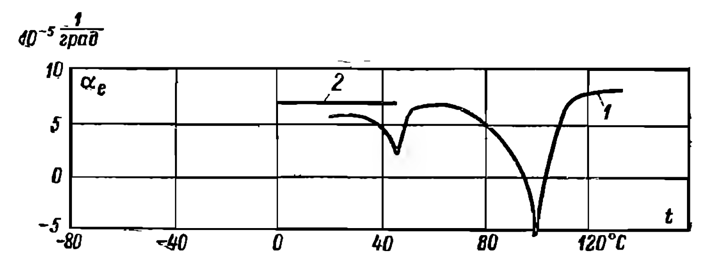
Цирконат бария не обладает сегнетоэлектрическими свойствами, однако смеси $BaTiO_3$ и $BaZrO_3$ с содержанием до 40% (молекулярных) цирконата бария не только принадлежат к сегнетокерамическим, но и характеризуются, как и в случае системы $BaTiO_3$—$BaSnO_3$, высокой диэлектрической проницаемостью в точке Кюри. Вместе с тем диэлектрическая проницаемость для некоторых составов обладает резкой зависимостью от напряженности поля, достигая высоких значений (при температуре $t = 0{,}87 t_к$);



Фиг. 50. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости; $f = 10^3$ *гц*; $E \approx 1$ *в/мм*

$BaZrO_3$ / $BaTiO_3$, мол. %	0 / 100	10 / 90	15 / 85	20 / 80	25 / 75	30 / 70	40 / 60
Кривые	1	2	3	4	5	6	7

напряженность, соответствующая точке максимума, составляет около 1,5 *кв/см* (фиг. 52). При концентрациях цирконата бария 15 ... 30 мол.% пьезоэлектрические свойства керамики сохра-

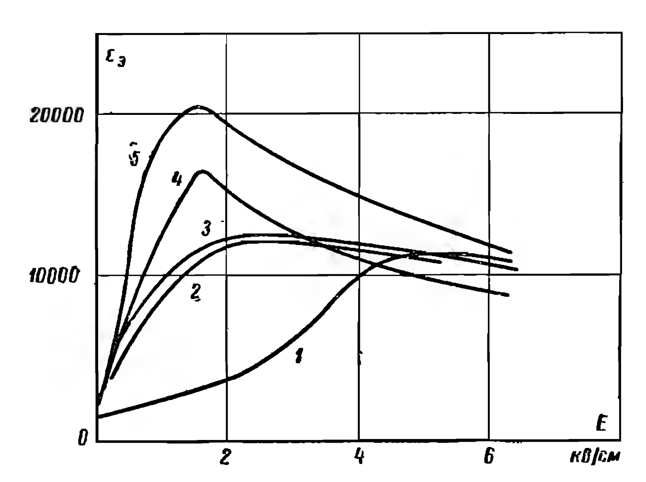


Фиг. 51. Температурные зависимости коэффициента линейного расширения α_l для $BaTiO_3$—$BaZrO_3$

Кривые	1	2
$BaTiO_3$ / $BaZrO_3$, мол.%	95 / 5	80 / 20

няются и при температурах примерно на 25° С выше температур, соответствующих максимуму диэлектрической проницаемости в слабых полях. Таким образом, твердые растворы $BaZrO_3$

в $BaTiO_3$ при определенных соотношениях компонентов обладают свойствами, близкими к свойствам растворов $BaSnO_3$ в $BaTiO_3$. Малая объемная электрострикция предопределяет наличие высокой диэлектрической проницаемости в точке максимума при 20 мол.% $BaZrO_3$ в рассматриваемой системе, подобно тому, как это имело место примерно при 10 мол.%



Фиг. 52. Зависимости диэлектрической проницаемости от напряженности поля для растворов $BaZrO_3$ в $BaTiO_3$; $t = 0{,}87\ t_к$; $f = 50$ гц

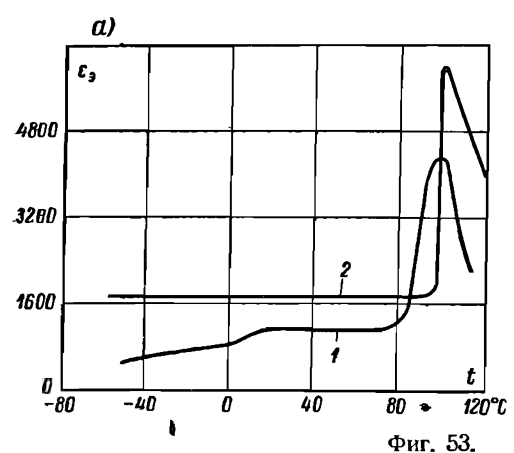
Кривые	1	2	3	4	5
$\frac{BaZrO_3}{BaTiO_3}$, мол.%	$\frac{0}{100}$	$\frac{10}{90}$	$\frac{15}{85}$	$\frac{25}{75}$	$\frac{20}{80}$

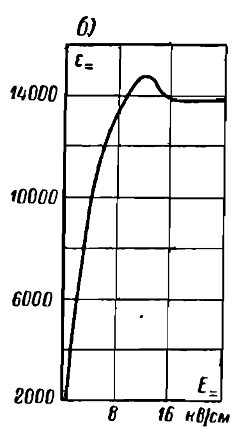
$BaSnO_3$. Аналогичные свойства имеют и некоторые другие более сложные системы, как, например, $BaSnO_3$—$SrTiO_3$—$BaTiO_3$ и $BaZrO_3$—$SrTiO_3$—$BaTiO_3$.

21. Твердые растворы титаната свинца в титанате бария

В системе может быть получен непрерывный ряд твердых растворов замещения, имеющих при нормальной температуре тетрагональную структуру $\left(\frac{c}{a} > 1\right)$. При увеличении концентрации $PbTiO_3$ имеет место смещение точки Кюри по линейному закону. Рассматриваемые твердые растворы, так же как и $BaTiO_3$, обладают положительной объемной электрострикцией; диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_э$ в слабых полях в точке максимума меньше, чем у титаната бария. Подобные твердые растворы с малой концентрацией $PbTiO_3$ часто получают не путем спекания предварительно синтезированных $PbTiO_3$ и $BaTiO_3$, а путем добавления к слабо обожженному

титанату бария свинцового сурика Pb_3O_4; при обжиге этой смеси ионы свинца замещают ионы бария, в результате образуется раствор $PbTiO_3$ в $BaTiO_3$.





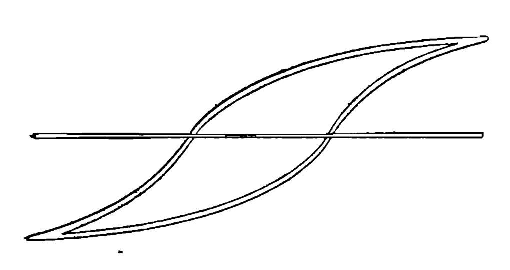
Фиг. 53.

а—Температурные зависимости диэлектрической проницаемости титаната бария с добавкой Pb_3O_4

1—2% Pb_3O_4; *2* —несколько процентов Pb_3O_4

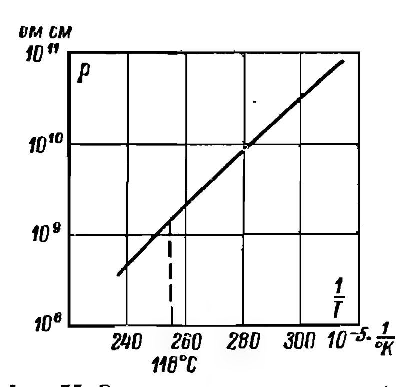
б—зависимость диэлектрической проницаемости $BaTiO_3$ с добавкой Pb_3O_4 от напряженности постоянного поля; $t = 20°$ С

При небольших добавках Pb_3O_4 сегнетоэлектрические свойства сохраняются, точка Кюри отвечает более низкой температуре, чем для титаната бария. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости имеет при содержании 3 ... 6% Pb_3O_4 характерную форму, отличающуюся тем, что в диапазоне рабочих температур диэлектрическая проницаемость сохраняется почти неизменной (фиг. 53, *а*). Зависимость диэлектрической проницаемости $\varepsilon_=$ от напряженности постоянного поля имеет слабо выраженный максимум. Значение $\varepsilon_=$ в максимуме— около 15000. Петля диэлектрического гистерезиза (фиг. 54) имеет большую площадь; этот вид керамики является, в известной мере, аналогом магнитножестких материалов. В то время как коэрцитивная напряженность поля для титаната бария составляет около 5 *кв/см*—в твердом растворе титаната свинца (4% в титанате бария) остаточная электрическая индукция



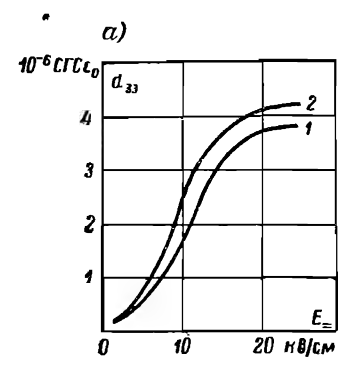
Фиг. 54. Диаграмма диэлектрического гистерезиза для $BaTiO_3$ с добавкой Pb_3O_4

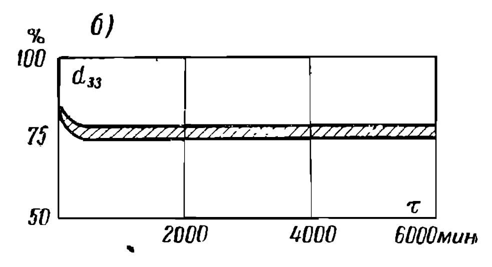
уменьшается незначительно даже при наложении обратного поля с напряженностью поля 25 *кв/см*. Такие свойства керамики, повидимому, обусловлены искаженной структурой кристаллов титаната бария. На эту мысль наводит то обстоятельство, что решетка титаната свинца $PbTiO_3$ имеет параметр $c = 4{,}140 \cdot 10^{-8}$ *см*, тогда как для $BaTiO_3$ $c = 4{,}026 \cdot 10^{-8}$ *см*; с другой стороны, для $PbTiO_3$ параметр $a = 3{,}894 \cdot 10^{-8}$ *см*, тогда как для $BaTiO_3$ $a = 3{,}986 \cdot 10^{-8}$ *см*.



Фиг. 55. Зависимость удельного объемного сопротивления системы $(Ba_{0,9}, Pb_{0,1})\,TiO_3$ от $\frac{1}{T}$ (образец в вакууме)

Диэлектрические потери в слабых полях характеризуются значением $\operatorname{tg}\delta_э \approx 0{,}04$ (при частоте $f = 10^3$ *гц*). Удельное объемное сопротивление около 10^{13} *ом·см*. Измеренное для системы $(Ba_{0,9}, Pb_{0,1})\,TiO_3$ удельное объемное сопротивление при температуре 100° C оказалось равным около 10^9 *ом·см* (фиг. 55). Измерения производились в вакууме в целях исключения влияния влаги. С увеличением содержания $PbTiO_3$ объемное сопротивление падает; так при 70° C величина ρ_V для $BaTiO_3$ составляет около $3 \cdot 10^{11}$ *ом·см*, для $(Ba_{0,8}, Pb_{0,2})\,TiO_3$—всего лишь 10^{10} *ом·см*.





Фиг. 56. Пьезоэлектрические характеристики одного из твердых растворов титаната свинца в титанате бария; зависимости статического пьезомодуля d_{33}: *а* — от градиента поля; *б* — от времени

1—поляризация 10 мин.; *2*—поляризация 60 мин.

Существенный интерес представляют пьезоэлектрические свойства титаната бария с указанной добавкой Pb_3O_4; пьезомодуль сохраняется почти неизменным в широком диапазоне температур. Так, в интервале температур 30 . . . 90° C стати-

ческие пьезомодули по данным Е. К. Добрера имеют значения $d_{33}=(1{,}3 \ldots 1{,}7)\,10^{-10}$ *к/н*, $d_{31}=(6{,}6 \ldots 7{,}3)\,10^{-11}$ *к/н*. Длительность предшествующей поляризации и напряженность прикладываемого при этом поля имеют важное значение; заметного увеличения пьезоэффекта не наблюдается при длительности свыше 30 мин. и действии поля $E_{=}=20$ *кв/см* в течение свыше 30 мин. (фиг. 56). Влияние температуры в процессе поляризации сказывается мало. Если при температуре около точки Кюри выдержать образцы в поле $E_{=}=1{,}5$ *кв/см* в течение часа и затем охладить их в том же поле, то пьезоэффект увеличивается примерно на 15% по сравнению с образцами, поляризованными при нормальных условиях. После поляризации пьезоэффект несколько снижается, а затем через 5—10 дней сохраняет свое значение в течение года и больше.

Величина поперечного пьезомодуля d_{31} в значительно большей степени зависит от механической нагрузки, чем пьезомодуля d_{33}, в особенности для невысоких градиентов предшествующей поляризации. С увеличением нагрузки пьезомодуль d_{31} может снизиться и даже изменить свой знак. Динамический пьезомодуль определялся на образцах длиной 15 ... 32 *мм*, сечением 3×3 и 4×4 *мм*. При длительности поляризации 60 мин. и поляризующем поле $E_{=}=20$ *кв/см* пьезомодули имеют значения $d_{33}=(1{,}2 \ldots 1{,}4)\,10^{-10}$ *к/н*, $d_{31}=(5 \ldots 7)\,10^{-11}$ *к/н*. Уменьшение как длительности поляризации, так и напряженности поляризующего поля приводит к уменьшению значения пьезомодуля. Из этих данных видно, что динамические пьезомодули ниже соответственно статических. При повышении температуры динамический пьезомодуль несколько уменьшается.

Благодаря большому коэрцитивному градиенту поляризованные пьезоэлементы из этой керамики отличаются большим постоянством пьезоэлектрических свойств по сравнению с элементами из титаната бария. Из керамики на основе титаната бария с добавкой титаната свинца (4 ... 8%) построены пьезоэлементы для мощных ультразвуковых излучателей [Л. 58].

22. Твердые растворы титаната стронция в титанате бария

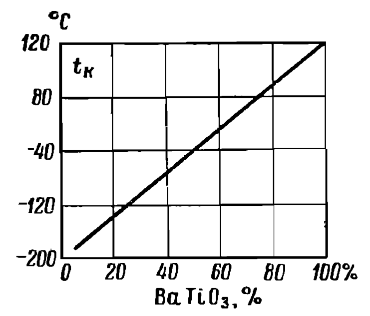
Титанат стронция является сегнетоэлектриком с точкой Кюри вблизи абсолютного нуля температур, около —250° С. Поэтому с увеличением концентрации $SrTiO_3$ точка фазового перехода смещается в область низких температур (фиг. 57).

Более отчетливо эту зависимость можно проследить на графиках фиг. 58 [Л. 60], из которых также видно, что диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_в$ в точке Кюри может достигать значения порядка 15000 при концентрациях 40—50% $BaTiO_3$ (при частоте $f=10^3$ *гц*).

Повышение частоты до $f=10^7$ *гц* вызывает небольшое

снижение диэлектрической проницаемости керамики со значительным содержанием $SrTiO_3$; это изменение не превышает 10%. При частоте $f=9{,}45 \cdot 10^9$ *гц* диэлектрическая проницаемость много ниже, чем при частоте 10^6 *гц*, но снижение происходит, начиная от концентрации 62% (по весу) $BaTiO_3$ и выше; при столь высоких частотах сочетание наименьшего значения $\operatorname{tg} \delta_э$ (0,02) с наиболее высокой диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_э$ (760) имеет место при концентрации 56% $BaTiO_3$ (фиг. 59).

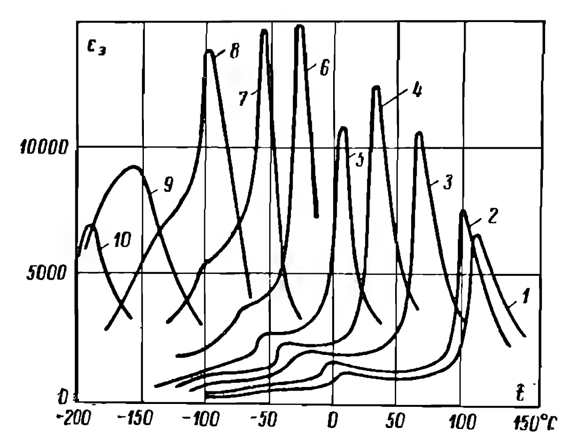
При повышении температуры во всех твердых растворах наблюдается в точках фазовых переходов скачок в отрицательную сторону коэффициента линейного расширения так же, как и в титанате бария. Отсюда следует, что объемная электрострикция этих растворов положительна.



Фиг. 57. Зависимость температуры в точке Кюри от содержания $BaTiO_3$ для системы $BaTiO_3 — SrTiO_3$

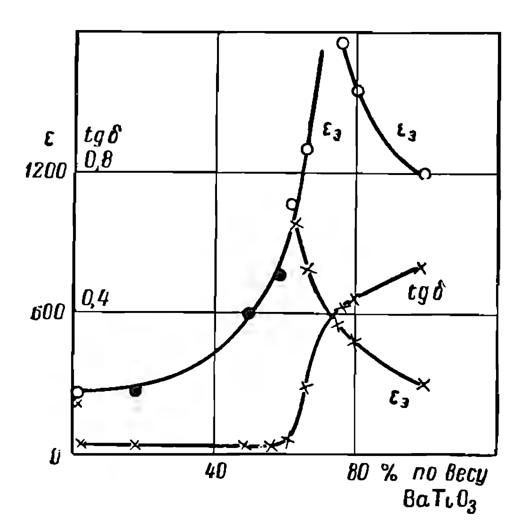
Исследования, проведенные в сильных полях, показывают, что с увеличением концентрации $BaTiO_3$ усиливается зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности поля, но одновременно увеличиваются диэлектрические потери. Влияние напряженности поля на величину $\varepsilon_э$ также возрастает по мере приближения температуры к точке Кюри для этого состава (фиг. 60). Увеличение частоты вызывает некоторое снижение максимальной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{макс}$, причем значение $\varepsilon_{макс}$ наступает при более низких напряженностях поля. При частотах 10^6 и 10^7 *мггц* значения $\varepsilon_{макс}$ в сильных полях отличаются друг от друга лишь на несколько процентов. Зависимость диэлектрической проницаемости $\varepsilon_=$ от напряженности поля (фиг. 61) для материала, содержащего около 25% (мол.) $SrTiO_3$, характеризуется наличием довольно острого максимума, причем в максимуме $\varepsilon_=$ может достигать 12 000.

Удельное объемное сопротивление, измеренное в условиях высокого вакуума (для исключения влияния влаги), падает с ростом температуры, претерпевая перелом в точке Кюри (фиг. 62). При температуре 100° С значение ρ_V составляет около $5 \cdot 10^9$ *ом·см* для системы $(Ba_{0,9}Sr_{0,1})TiO_3$. При изменении соотношения между $BaTiO_3$ и $SrTiO_3$ удельное объемное сопротивление проходит через минимум, соответствующий содержанию 70 . . . 80% $BaTiO_3$. Пробивная напряженность для состава с $t_к = -100°$ С при поле, близком к однородному (образцы с лункой), практически не зависит от величины диэлектрической проницаемости; так при $f = -183°$ С ($\varepsilon_э = 4600$



Фиг. 58. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости для $BaTiO_3 — SrTiO_3$; $E = 10$ *в/см*; $f = 10^3$ *гц*

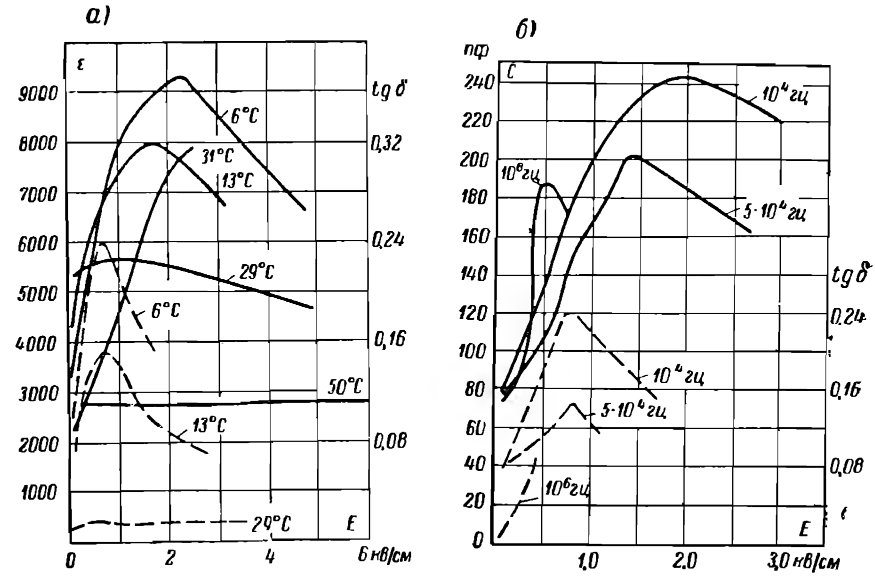
Кривые	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\frac{BaTiO_3}{SrTiO_3}$, мол. %	$\frac{100}{0}$	$\frac{90}{10}$	$\frac{80}{20}$	$\frac{70}{30}$	$\frac{60}{40}$	$\frac{50}{50}$	$\frac{40}{60}$	$\frac{30}{70}$	$\frac{20}{80}$	$\frac{10}{90}$



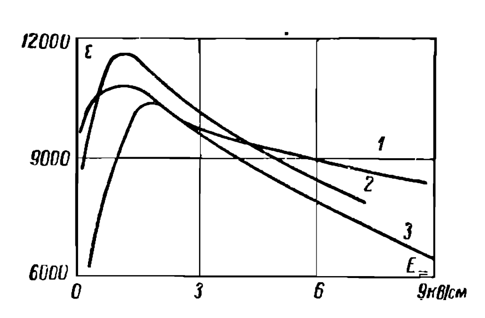
Фиг. 59. Зависимость диэлектрической проницаемости $\varepsilon_э$ и $\mathrm{tg}\,\delta_э$ для системы $BaTiO_3 — SrTiO_3$ от содержания $BaTiO_3$ при температуре $t = 20°$ С

OOOOO $f=1{,}5 \cdot 10^6$ *гц*; XXXXX $f=9{,}45 \cdot 10^9$ *гц*

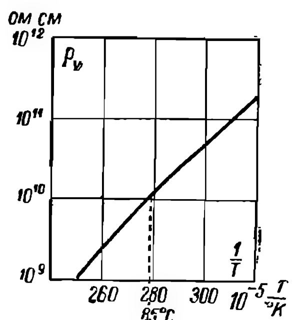
перед пробоем) $E_{пр}=52$ *кв/см* ($f=50$ *гц*, толщина 1—2 *мм*); выше точки Кюри при $t=+22°$ С ($\varepsilon_в=3000$) $E_{пр}=51$ *кв/см* [Л. 48]. Обратимые изменения диэлектрической проницаемости,



Фиг. 60. Зависимости диэлектрической проницаемости и $\operatorname{tg}\delta_э$ для системы $\frac{SrTiO_3}{BaTiO_3}=\frac{31}{69}$ от напряженности поля: *а* — для различных температур, $f=10^4$ *гц*; *б* — для различных частот, $t=5°$ С. Пунктирные кривые — $\operatorname{tg}\delta_э$, сплошные — $\varepsilon_э$ или $C_э$



Фиг. 61. Зависимости диэлектрической проницаемости $\varepsilon_=$ от напряженности постоянного поля для системы $\frac{SrTiO_3}{BaTiO_3}=\frac{25}{75}$; *1)* $t=12°$ С; *2)* $t=28,5°$ С; *3)* $t=41°$ С



Фиг. 62. Зависимость удельного объемного сопротивления системы $(Ba_{0,9},\ Sr_{0,1})$ TiO_3 от $\frac{1}{T}$ (образец в вакууме)

происходящие в первое время после изготовления образцов, для ряда обследованных систем [Л. 39] могут достигать 10%.

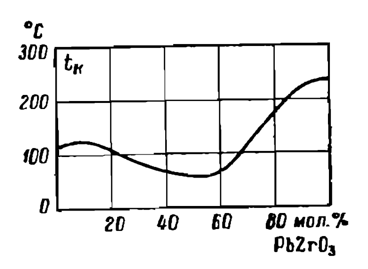
23. Твердые растворы титаната кальция в титанате бария

Рассматриваемые твердые растворы являются ограниченными и образуются лишь в определенном интервале концентраций. Изучение керамических материалов, полученных при различных соотношениях между $CaTiO_3$ и $BaTiO_3$, показывает, что диэлектрическая проницаемость резко уменьшается при увеличении содержания $CaTiO_3$ [Л. 61]. Значения $\varepsilon_э$ и $\operatorname{tg} \delta_э$ для большинства образцов изменяются через некоторое время. Диэлектрическая проницаемость может снизиться на 17,5%, а $\operatorname{tg} \delta_э$ на 219% (по отношению к значению, измеренному через 6 мес.). В противоположность системе $BaTiO_3$—$SrTiO_3$ рассматриваемые твердые растворы не обнаруживают температурного максимума диэлектрической проницаемости в интервале от —60 до +85° С. Так как $CaTiO_3$ обладает падающей температурной зависимостью диэлектрической проницаемости, а $BaTiO_3$—возрастающей (до 120° С), то при некоторых соотношениях компонентов можно ожидать, что диэлектрическая проницаемость будет мало меняться с температурой. Действительно для системы $\frac{CaTiO_3}{BaTiO_3} = \frac{65}{35}$ диэлектрическая проницаемость, составляя ~260, отклоняется в интервале температур —50 ... +60° С только на 8%. Обращает на себя внимание относительно высокий коэффициент температурного расширения; так для системы $\frac{CaTiO_3}{BaTiO_3} = \frac{50}{50}$ в интервале 20—300° С средний температурный коэффициент расширения составляет $9{,}5 \cdot 10^{-6}$ 1/*град*. Заметим, что для чистого $CaTiO_3$ эта величина близка к указанной и составляет $10{,}3 \cdot 10^{-6}$ 1/*град*; поэтому при введении $CaTiO_3$ приходится принимать меры предосторожности, чтобы избежать растрескивания образцов при серебрении и при пайке выводов к электродам.

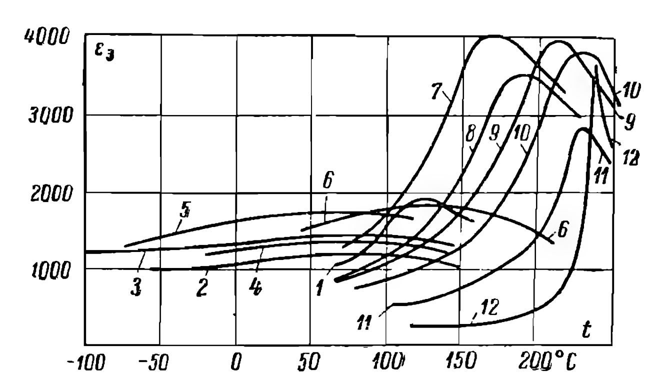
24. Взаимные твердые растворы титаната бария, цирконата бария, титаната свинца и цирконата свинца

Рассматриваемая система отличается тем, что в твердых растворах одновременно замещаются как двухвалентные, так и четырехвалентные ионы. Система представляет собой растворы четырех соединений $BaTiO_3$, $BaZrO_3$, $PbTiO_3$ и $PbZrO_3$. Если через n^2 обозначить молярное содержание цирконата свинца в смеси (n—в долях единицы), то в рассматриваемой системе содержится $(1-n)^2$ долей $BaTiO_3$, n^2—долей $PbZrO_3$ и по $n(1-n)$ молярных долей $BaZrO_3$ и $PbTiO_3$ [Л. 14]. Системы можно также рассматривать как твердые растворы (Ba, Pb) TiO_3 и (Ba, Pb) ZrO_3 или как твердые растворы Ba(Ti, Zr) O_3 и Pb(Ti, Zr) O_3; в небольшом интервале концентраций цирконата свинца (35 ... 55 мол.%) в данной системе образуется

гетерогенная смесь; для составов, содержащих от 20 до 70 мол.% $PbZrO_3$, диэлектрическая проницаемость слабо зависит от изменений температуры. Особенность технологического процесса изготовления керамики обусловлена летучестью соединений свинца при относительно невысоких температурах; поэтому обжиг цирконата свинца ведут в атмосфере окиси свинца. При температуре обжига 1050° С (максимальной) и часовой выдержке, как показывает химический анализ образцов, в обожженной смеси окиси свинца меньше на 2 . . . 2,5%, чем в исходной. Обжиг исследованных образцов керамики производился в атмосфере окиси свинца при температуре 1250—1450° С. Температура Кюри твердого раствора из рассмотренных ранее, в котором один катион замещается на другой, изменяется приблизительно линейно с увеличением концентрации одного из компонентов (например, $BaTiO_3$—$SrTiO_3$).



Фиг. 63. Зависимость температуры в точке Кюри от концентрации $PbZrO_3$ в системе $BaTiO_3$ — $PbZrO_3$ — $BaZrO_3$ — $PbTiO_3$

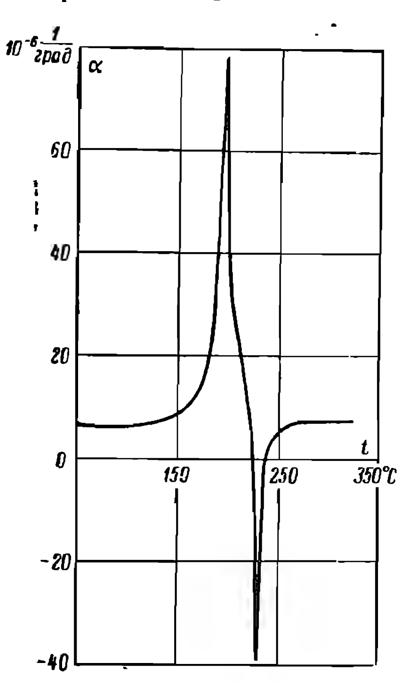


Фиг. 64. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости $\varepsilon_э$ твердых растворов $BaTiO_3$ — $PbZrO_3$; $E = 20$ *в/см*; $f = 10^3$ *гц*; соотношения даны в мол. процентах

Кривые . . .	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$BaTiO_3$	90	70	60	50	40	30	20	18	15	10	5	0
$PbZrO_3$	10	30	40	50	60	70	80	82	85	90	95	100

В данной системе эта зависимость имеет нелинейный характер (фиг. 63). Диэлектрическая проницаемость керамики ($BaTiO_3$—$PbZrO_3$) при содержании от 20 до 70 мол.% $PbZrO_3$ мало изменяется с изменением температуры (фиг. 64); при

этом не удается также обнаружить и диэлектрический гистерезис даже при изменении температуры и градиента поля в широком интервале. При 80 мол.% $PbZrO_3$ и выше температурная зависимость диэлектрической проницаемости переходит через максимум; температура точки Кюри соответствует температурам от 170° С до 238° С; некоторое изменение $t_к$ по сравнению с данными других измерений ($t_к$= 276° С), повидимому, обязано наличию отклонений в составе. Наибольшее значение $\varepsilon_э$ составляет около 4000.



Фиг. 65. Температурная зависимость коэффициента линейного расширения для твердого раствора $\frac{BaTiO_3}{PbZrO_3} = \frac{5}{95}$

В твердых растворах с содержанием цирконата свинца свыше 70% наблюдается диэлектрический гистерезис, особенно отчетливо при концентрациях $PbZrO_3$ 80 . . . 95 мол. %. При высоком содержании цирконата свинца так же, как и в самом цирконате свинца, имеют место два фазовых перехода: первый переход при более низкой температуре, второй — при более высокой. Из температурной зависимости коэффициента линейного расширения (фиг. 65) видно, что первый переход сопровождается отрицательной объемной электрострикцией, второй - положительной электрострикцией. Это не наблюдается при концентрациях 40 . . . 70% $PbZrO_3$.

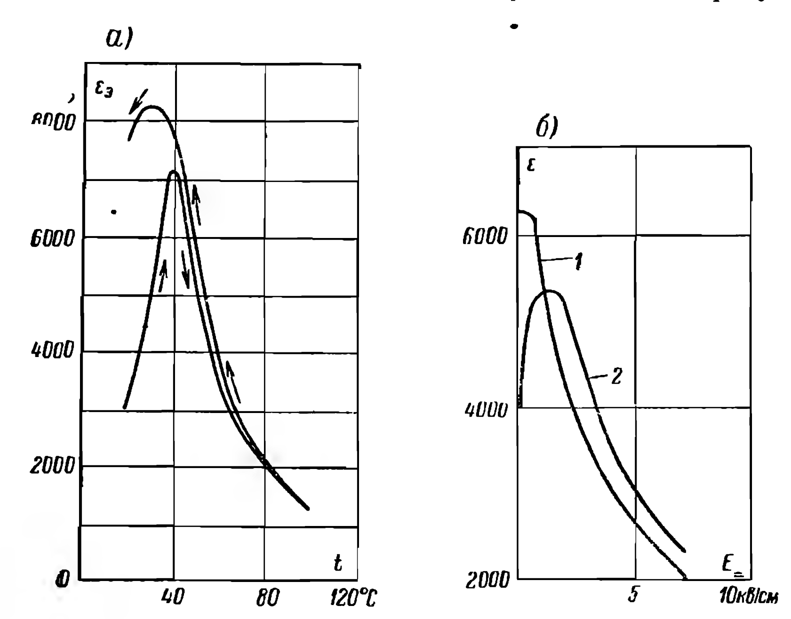
25. Твердые растворы титаната кальция и титаната стронция в титанате бария

В ограниченной области концентрацией возможно образование твердых растворов $BaTiO_3—SrTiO_3—CaTiO_3$. Один из них ($t_к \approx 35°$ С) имеет температурную зависимость диэлектрической проницаемости с острым максимумом (фиг. 66) [Л. 27].

Величина $tg\,\delta_э$ при температуре t=30° С достигает 0,08 (при $f=10^6$ *гц*), а при дальнейшем повышении температуры снижается, сохраняя почти неизменное значение до температуры 80° С.

Зависимость реверсивной диэлектрической проницаемости

от напряженности постоянного поля при нормальных условиях ($t=20°$ С) зависит от того, снимается ли она сразу после изготовления или же через некоторое время. Для образца, выдержанного при нормальных условиях, реверсивная проницаемость с ростом $E_=$ вначале растет, а затем падает; для получения максимальной реверсивной проницаемости требуется

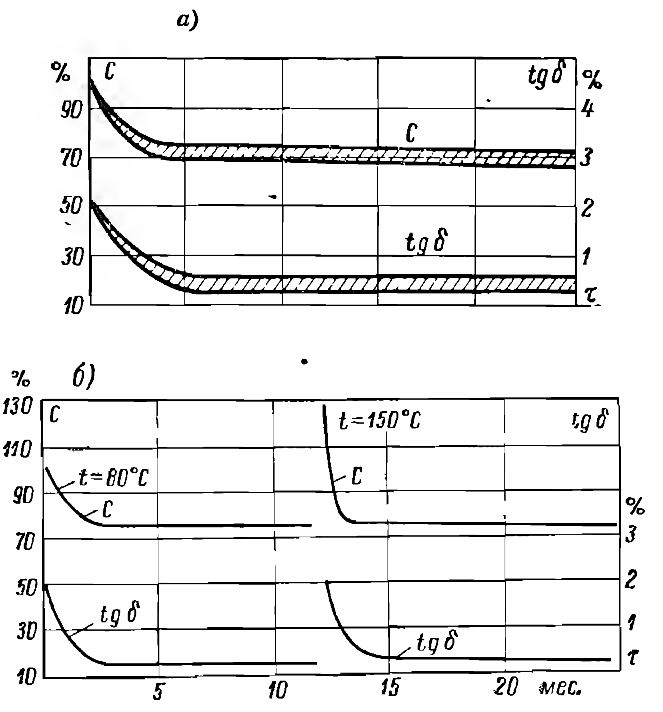


Фиг. 66. Зависимость диэлектрической проницаемости твердого раствора $BaTiO_3$ — $SrTiO_3$ — $CaTiO_3$: *а* — от температуры в слабом поле; *б* — от напряженности постоянного поля при нормальной температуре

1—измерения проведены сразу после изготовления; *2*—измерения проведены через 2 мес.

более высокое значение $E_=$, чем в случае только что изготовленного образца; относительное изменение ε_p для такого образца больше (кривая *1*, фиг. 69). Из этих данных следует, что керамика этого типа характеризуется большими обратимыми изменениями $\varepsilon_э$ и $\operatorname{tg}\delta_э$. Это видно также из кривых изменения емкости и $\operatorname{tg}\delta_э$; емкость образцов меняется на 25—30%, в условиях хранения при нормальной температуре, к которой близка температура, отвечающая точке Кюри $t_к=35°$ С (фиг.67). При прогревании керамики ее диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь возрастают, причем выдерживание при температуре 80° С приводит к временному увеличению емкости конденсатора на 20%, а при $t=150°$ С—примерно на 40%. Этим объясняется различие между прямой и обратной температурными зависимостями $\varepsilon_э$ (фиг. 67, *а*). После охлаждения про-

исходит повторное уменьшение емкости, как и после изготовления конденсатора. При увеличении содержания $CaTiO_3$ температурная зависимость сглаживается, а величина диэлектрической проницаемости в максимуме падает. Материал с соотношением $BaTiO_3$—52,5%, $SrTiO_3$—17,5% и $CaTiO_3$—10% имеет



Фиг. 67. Зависимости емкости и тангенса угла потерь от времени для образца твердого раствора титаната кальция и титаната стронция в титанате бария с $t_к = 35°$ С: *а* — изменения при нормальных условиях; *б* — то же, но после предварительного 24-часового прогрева при температурах 80 и 150° С

слабую зависимость диэлектрической проницаемости от температуры; максимум ($\varepsilon_э = 1000$) лежит около 20° С; в интервале температур от —60° С до +80° С диэлектрическая проницаемость изменяется на 15%. Материал с соотношением $BaTiO_3$—20%, $SrTiO_3$—70%, $CaTiO_3$—10% имеет при комнатной температуре $\varepsilon_э = 400$. В последних двух материалах влияние поля при комнатной температуре почти не сказывается на величины $\varepsilon_э$ и $\mathrm{tg}\,\delta_э$.

Глава четвертая

ОСНОВЫ РАСЧЕТА И КОНСТРУКЦИЯ СЕГНЕТОКОНДЕНСАТОРОВ

26. Напряжение конденсатора, отвечающее электрической прочности сегнетокерамики

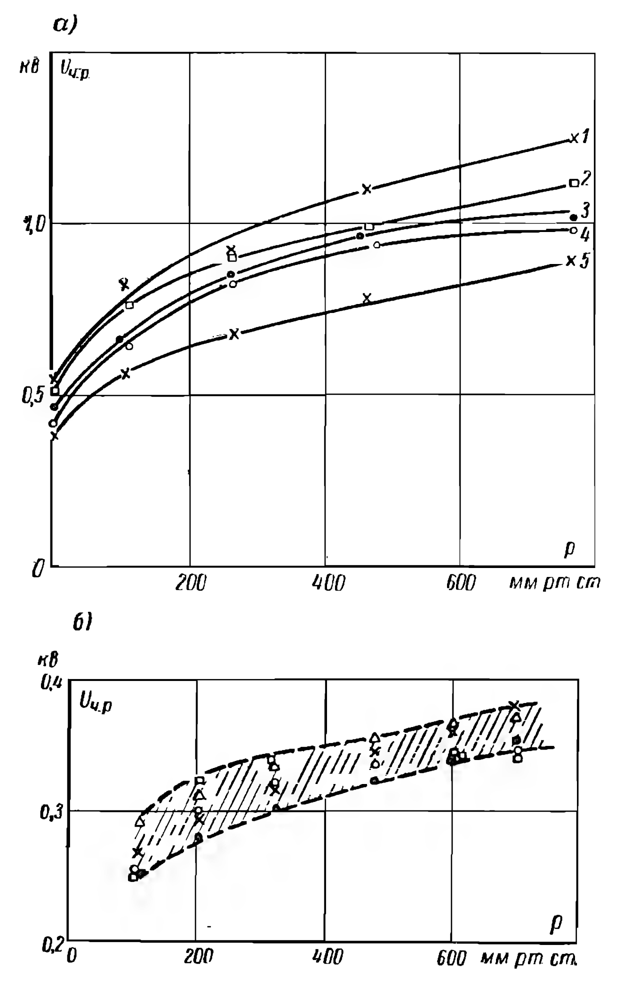
Одним из важных параметров сегнетоконденсатора является его номинальное (рабочее) напряжение. Величина этого напряжения должна удовлетворять при заданной частоте условиям электрической прочности, условиям допустимого нагревания и требуемым сегнетоэлектрическим свойствам, которые тесно связаны с величиной напряжения. Заметное отклонение напряжения в условиях эксплуатации от номинальной величины, если это отклонение и допустимо по условиям нагревания или электрической прочности, может привести к снижению величин, характеризующих требуемые сегнетоэлектрические свойства. В связи с этим рабочее напряжение, как правило, должно равняться номинальному напряжению сегнетоконденсатора.

Рассмотрим условия, предопределяющие величину номинального напряжения в связи с электрической прочностью изоляции конденсатора. Повышая напряжение на керамическом конденсаторе, наблюдают при некотором значении напряжения возникновение частичных разрядов у краев электродов или пробой керамики; при наличии газовых включений возможно появление заметных частичных разрядов и во включениях, особенно при высоких частотах. Определяемое при испытаниях керамики значение пробивной напряженности $E_{пр.п}$ представляет собой усредненную величину, вычисляемую в согласии с заданными условиями по интегральной кривой (глава восьмая); к этим условиям иногда относится допускаемая возможность пробоя некоторой части (например, $n=5\ldots10\%$) общего числа образцов. Условия испытания (частота, толщина керамики) должны соответствовать условиям работы конденсатора при нормальной температуре.

Рабочая напряженность поля $E'_{раб}$, выбранная из условий разряда, должна составлять некоторую часть от напряженности $E_{пр.п}$ (см. параграф 51) с учетом уменьшения пробивной напряженности (старения) после длительной работы

$$E'_{раб} = \frac{E_{пр.п}}{k_1}. \qquad (87)$$

При $n = 10\%$ коэффициент k_1 для титаната бария принимают равным 3 ... 5.

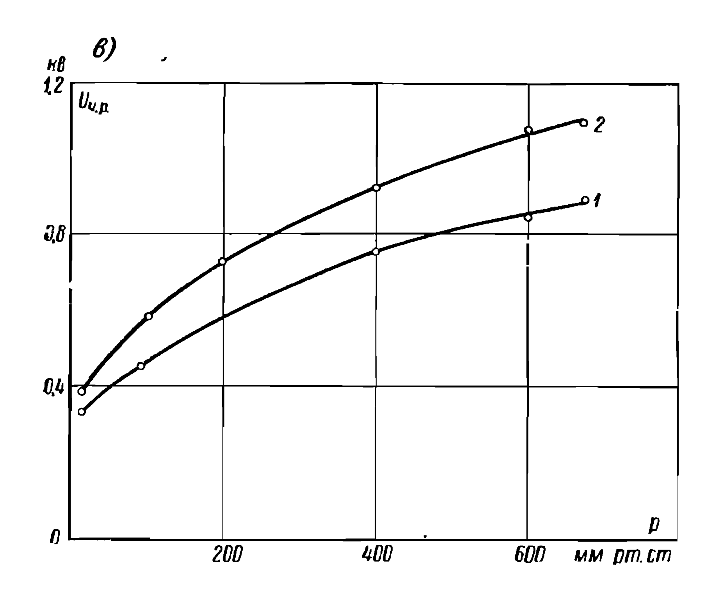


В большинстве случаев напряженность поля $E_{ч.р}$, соответствующая началу частичных разрядов, оказывается ниже $E_{пр.п}$. При этих условиях выбирают рабочую напряженность поля

исходя из величины $E_{ч.р}$, причем устанавливают некоторый коэффициент запаса k_2

$$k_2 = \frac{E_{ч.р}}{E'_{раб}}, \qquad (88)$$

учитывающий разброс значений $E_{ч.р}$, а также и то, что обнаружение частичных разрядов возможно лишь при их известной интенсивности; приходится принимать во внимание и



Фиг. 68. Зависимость напряжения частичных разрядов от давления воздуха:

а — образцы толщиной 1,5 . . . 3 *мм* в воздухе

Кривые	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*
Закраина, *мм* . . .	2	3	2	1	2
Толщина, *мм* . . .	3	2	2	2	1,5

б — образцы толщиной около 0,3 *мм* в воздухе; керамика с $t_к = 3°$ С

□□□□ закраина 2 *мм*; OOOO закраина 3 *мм*; керамика с $t_к$=70° С, △△△△ закраина 3 *мм*; ●●●● закраина 2 *мм*; ×××× закраина 1 *мм*

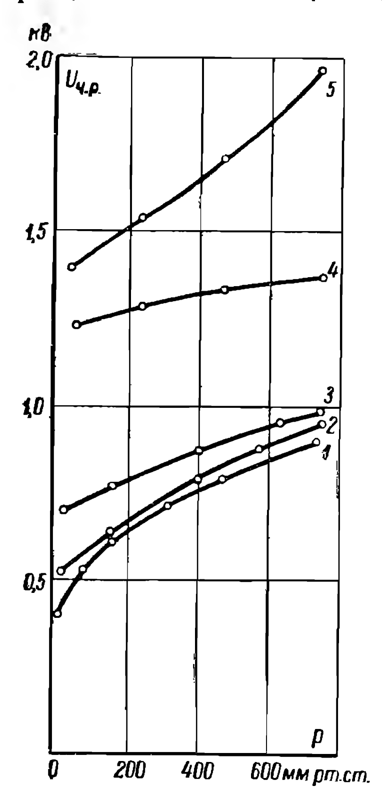
в — образцы (толщина 1 *мм*, закраина 2 *мм*)

1—покрытые на краях слоем легкоплавкой глазури; *2*—без слоя глазури

уменьшение напряжения частичных разрядов во время эксплуатации.

Исследования зависимости напряжения частичных разрядов для сегнетокерамики [Л. 62] от давления воздуха, толщины и

других факторов для образцов в форме дисков показывают следующее. С уменьшением давления воздуха напряжение частичных разрядов падает (фиг. 68), особенно быстро у образцов большей толщины (2 ... 3 *мм*). Для тонких образцов это снижение значительно меньше. Величина закраины, т. е. ширина непосеребренного пояска между электродом и краем диска, сказывается только при давлениях свыше 100 *мм* рт. ст. и лишь для толщин свыше $h=1$ ... 1,5 *мм*. При постоянном токе напряжение частичных разрядов выше, чем при переменном, и с понижением давления воздуха резко падает, приближаясь к величине напряжения частичных разрядов при переменном токе. Влияние величины закраины на напряжение ионизации в случае малой толщины керамики ($h \approx$ 0,3 *мм*) не удается обнаружить (фиг. 68, *б*) и поэтому при таких толщинах величину закраины приходится выбирать равной 1 ... 2 *мм*, исходя из необходимости исключить случайное затекание серебра при вжигании на другой электрод. Повышение напряжения частичных разрядов возможно при заливке конденсатора вазелином или маслом (фиг. 69); при этом благодаря затвердеванию вазелина при отрицательных температурах и образованию воздушных включений напряжение частичных разрядов на морозе оказывается ниже, чем при нормальных условиях. Влияние давления воздуха на напряжение $U_{ч.р}$ при использовании масла, повидимому, обусловлено недостаточной дегазацией масла. Градиент поля $E_{ч.р}$, измеренный на образцах толщиной $h=1$ *мм*, при закраине $a=2$ *мм*, частоте 50 *гц* и нормальном давлении составляет $E_{ч.р}=9$ *кв/см*, если окружающей средой является воздух, и $E_{ч.р}=19{,}8$ *кв/см*, если диск находится в конденсаторном масле. Повидимому путем вакуумной сушки масла и применения вакуума при заполнении



Фиг. 69. Зависимость напряжения частичных разрядов $U_{ч.р}$ от давления воздуха; образцы с толщиной 1 *мм* и с закраиной — 2 *мм*

1—в воздухе, *2* — в вазелине, $t=-3°$ С; *3*—в вазелине, $t=20°$ С; *4*—в вазелине, $t=40°$ С; *5*—в конденсаторном масле, $t=20°$ С, $f=50$ *гц*

конденсатора маслом удается заметно повысить градиент поля $E_{ч.р}$, отвечающий появлению частичных разрядов. Заметим, что при повышении частоты напряжение частичных разрядов понижается. Все изложенные результаты касаются лишь условий появления частичных разрядов у краев электродов, а не в порах керамики. Для некоторых типов конденсаторов в целях повышения напряжения частичных разрядов у края электрода применяется опрессовка термопластичными смолами или нанесение слоя компаунда.

Одним из методов повышения напряжения ионизации является покрытие края керамики и электрода глазурью с низкой температурой разлива. Если состав глазури подобран таким образом, что не появляется трещин или зазоров между слоем глазури и керамикой, то удается добиться существенного повышения напряжения частичных разрядов, что объясняется некоторым выравниванием поля у края электрода и повышением электрической прочности среды, окружающей электрод (фиг. 69). Коэффициент запаса k_2 по отношению к наименьшей напряженности поля, отвечающей появлению частичных разрядов, выбирают порядка 1,5 ... 2.

27. Напряжение конденсатора, отвечающее условиям нагревания

Напряжение, отвечающее условиям нагревания, зависит от разности температур между температурами наиболее нагретой области керамики и окружающей среды. Поэтому задачей расчета является определение напряжения по допустимой разности температур.

Одноэлементный конденсатор. В стационарном тепловом режиме активная мощность P_a, выделяемая в сегнетоконденсаторе, отводится в окружающую среду. Мощность, отводимая от конденсатора,

$$\sigma S_{ох}(t_{пов}-t_{ср})=P_a, \quad (89)$$

где

σ—коэффициент теплоотдачи [*вт/см²·град*];

$S_{ох}$—поверхность охлаждения [*см²*];

$t_{пов}$ и $t_{ср}$—температуры соответственно поверхности конденсатора и окружающей воздушной среды.

Для предварительных расчетов при небольших размерах конденсатора принимают

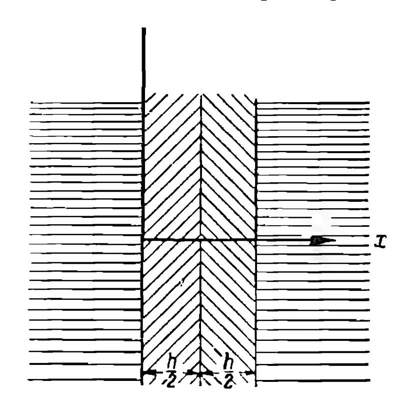
$$\sigma=2\cdot10^{-3}\ вт/см^2\cdot град.$$

Перепад температур на поверхности

$$\Delta t_{пов}=t_{пов}-t_{ср}=\frac{\varepsilon_э \operatorname{tg}\delta f U^2}{1{,}8\cdot10^{12}k_{кон}\sigma h}. \quad (90)$$

$k_{кон}$—коэффициент конфигурации, представляющий отношение площади поверхности охлаждения к площади электрода; значения коэффициента конфигурации: для диска—2, для цилиндра—1,5, для горшкового конденсатора—1, для боченочного конденсатора 4 ... 5 [Л. 63]. Толщина керамики в конденсаторах низкого напряжения невелика и при малых градиентах поля перепадом температур в керамике пренебрегают. При больших градиентах поля температура внутри керамики может заметно превзойти температуру на поверхности.

Рассмотрим условия теплопередачи в плоском конденсаторе. Если обозначить через λ_0—коэффициент теплопроводности керамики, $P_{а. уд}$ — удельные потери в единице объема и считать, что тепловой поток направлен перпендикулярно плоскости, то при установившемся тепловом режиме (фиг. 70)



Фиг. 70. К расчету перепада температур в плоском конденсаторе

$$P_{а. уд} + \lambda_0 \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0. \qquad (91)$$

Отсюда температура

$$t = -\frac{P_{а. уд}}{2\lambda_0} x^2 + A_1 x + A_2. \qquad (92)$$

Постоянные интегрирования A_1 и A_2 определяют из граничных условий. При $x = \frac{h}{2}$ теплоотвода нет и $\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{x=\frac{h}{2}} = 0$:

$$-\frac{P_{а. уд}}{\lambda_0} \frac{h}{2} + A_1 = 0.$$

При $x=0$ температура t равна температуре на поверхности конденсатора $t_{пов}$:

$$(t)_{x=0} = A_2 = t_{пов}. \qquad (93)$$

С учетом значений постоянных A_1 и A_2 получаем

$$t = -\frac{P_{а. уд}}{2\lambda_0} x^2 + \frac{P_{а. уд}}{\lambda_0} \frac{h}{2} x + t_{пов}. \qquad (94)$$

Наиболее высокая температура t_m имеет место при $x = \frac{h}{2}$.

$$t_m = -\frac{P_{а. уд}}{8\lambda_0} h^2 + \frac{P_{а. уд} h^2}{4\lambda_0} + t_{пов} = \frac{P_{а. уд}}{8\lambda_0} h^2 + t_{пов}. \qquad (95)$$

Удельная мощность (глава первая, параграф 4)

$$P_{a.\,уд}=\frac{f\varepsilon_э \operatorname{tg}\delta_э E^2}{1{,}8\cdot 10^{12}}\ [вт/см^3]. \qquad (96)$$

Поэтому перепад температур в керамике

$$\Delta t_{кер}=t_m-t_{пов}=\frac{\varepsilon_э f \operatorname{tg}\delta_э U^2}{14{,}4\cdot 10^{12}\lambda_0}, \qquad (97)$$

где λ_0 измеряется в *вт/см·град*, f—в *гц*, U—в вольтах.

Общий перепад температур для плоского конденсатора будет равен

$$\Delta t=\Delta t_{кер}+\Delta t_{пов}=\frac{\varepsilon_э \operatorname{tg}\delta_э f U^2}{3{,}6\cdot 10^{13}}\left[\frac{1}{4\lambda_0}+\frac{1}{\sigma h}\right]. \qquad (98)$$

Многоэлементный конденсатор. Такой конденсатор иногда заключен в корпус из металла, керамики или пластмассы. Условия теплопередачи для конденсатора, заключенного в герметический корпус, усложняются. Перепад температур имеет несколько составляющих, в том числе и перепад температур между корпусом и окружающей средой. Коэффициенты теплоотдачи, определяющие величину перепада температур между корпусом и средой, были обследованы для цилиндрических корпусов небольшого объема автором, Е. Л. Гинзбургом и В. П. Смирновым. Для латунных корпусов (d_2=25 ... 40 *мм*, l=25 ... 35 *мм*) при величине подводимой мощности P_a= =2 ... 5 *вт* эта зависимость показана на фиг. 71, *а*. Для алюминиевых корпусов (d_2=35 *мм*, l=38 ... 75 *мм*) при мощности P_a=1,5 ... 6 *вт* кривая $\sigma(p)$ представлена на фиг. 71, *б*. Теплоотдача от корпуса из пластмассы (d_2=25 ... 33 *мм*, l= =40 ... 70 *мм*) при мощности P_a=2 ... 4 *вт* характеризуется зависимостью, показанной на фиг. 71, *в*. Коэффициент теплоотдачи для латунного корпуса при нормальном давлении составляет около (1,5 ... 2)$\cdot 10^{-3}$ *вт/см²·град*, при давлении 10 *мм* рт. ст. эта величина снижается до $1\cdot 10^{-3}$ *вт/см²·град*; для получения более высоких значений коэффициента теплоотдачи целесообразно добиваться соотношения $\frac{d}{h}\approx 1$. Сравнение опытных данных, найденных для указанных небольших корпусов, с расчетными показывает, что полученные расчетом величины σ больше действительных на 15 ... 30%.

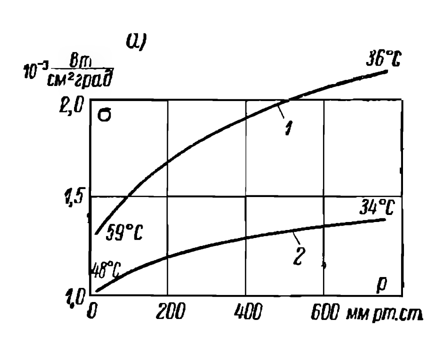
Указанные зависимости могут быть использованы при определении коэффициентов теплоотдачи от корпусов конденсаторов. Переходя к расчету разности температур $\Delta t_{m\cdot cp}$ между температурами наиболее нагретой области керамики и окружающей среды, рассмотрим конденсатор, состоящий из ряда параллельно соединенных дисков, заключенных в герметический корпус, залитый изолирующим веществом.

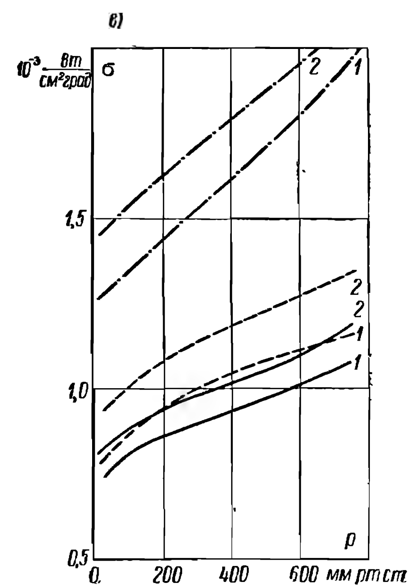
Перепад температур в случае многодискового сегнетоконденсатора складывается из следующих величин

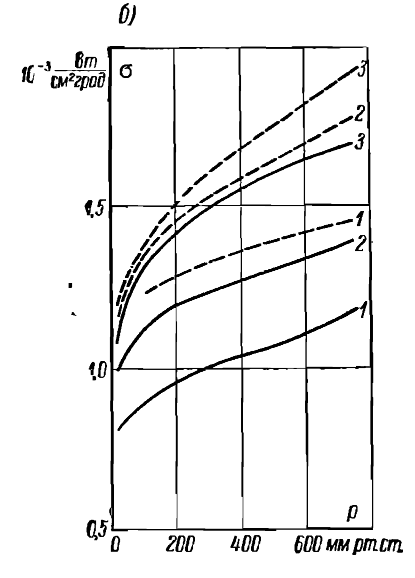
$$\Delta t_{т.\,ср} = \Delta t_0 + \Delta t_{01} + \Delta t_{12} + \Delta t_{2ср}, \qquad (99)$$

где Δt_0—перепад температур в сегнетокерамике;

Δt_{01}—то же, но в слое изоляции, окружающем столбик из дисков;







Фиг. 71. Зависимости коэффициента теплоотдачи от давления воздуха:

а—для корпуса из латуни, имеющего размеры:

1) d_2=26 мм, l=25 мм; 2) d_2=37,5 мм, l=34,5 мм

б — для корпуса из алюминия, имеющего размеры:

пунктир—d_2=34,5 мм; l = 37,5 мм; сплошная линия d_2 = 34,5 мм; l = 74 мм; 1) P_a=1,5 вт; 2) P_a=3 вт; 3) P_a=6 вт

в — для корпуса из пластмассы (полиуретан), имеющего размеры:

пунктир с точкой d_2 = 26 мм; l=39 мм; пунктир – d_2=26 мм; l=70 мм; сплошная линия – d_2=32,5 мм; l=70 мм; 1) P_a=2 вт; 2) P_a=4 вт

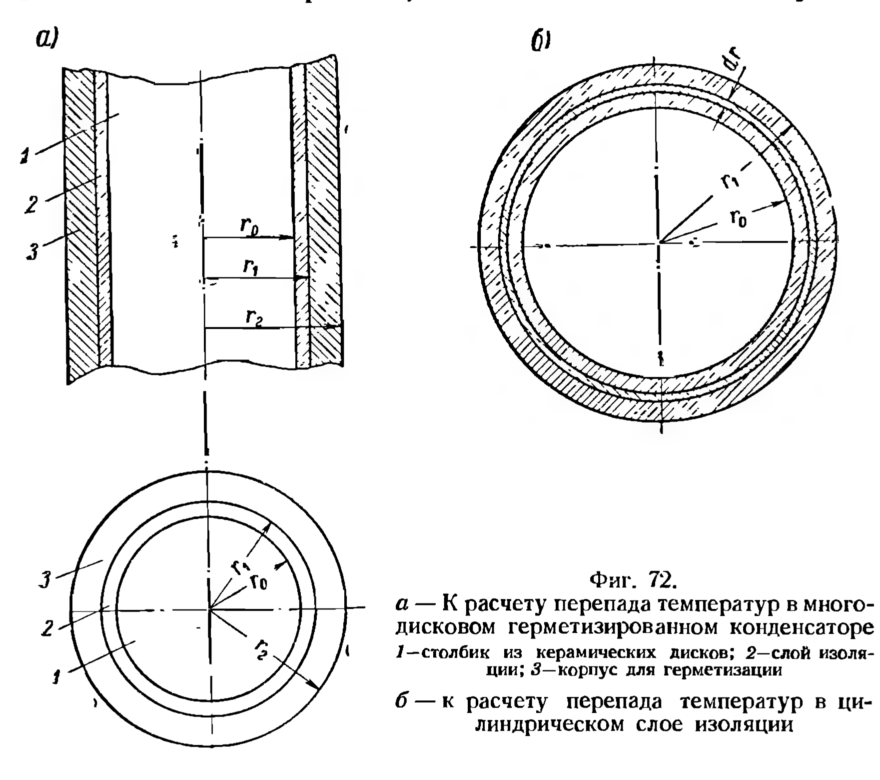
Δt_{12}—то же, но в стенке корпуса;

$\Delta t_{2ср}$—перепад температур между наружной стенкой корпуса и окружающей средой.

Заметим, что в этом выражении не учтены температурные перепады между сегнетокерамикой и слоем изоляции, а также

между слоем изоляции и стенкой корпуса, которые малы по сравнению с другими слагаемыми. В случае использования металлического корпуса величина Δt_{12} пренебрежимо мала по сравнению с другими перепадами.

Рассмотрим многослойный дисковый конденсатор в установившемся тепловом режиме; для токоподвода используются



Фиг. 72.
а — К расчету перепада температур в многодисковом герметизированном конденсаторе
1—столбик из керамических дисков; *2*—слой изоляции; *3*—корпус для герметизации
б — к расчету перепада температур в цилиндрическом слое изоляции

сборные шинки по краям. Будем считать, что в столбике из дисков выделяемая мощность отводится только через цилиндрическую поверхность, слой изолирующего вещества и далее через стенку цилиндрического корпуса в окружающую среду (фиг. 72, *а*). Уравнение теплопередачи для столбика из дисков в полярных координатах может быть написано в виде

$$P_{a.\,уд} = -\lambda_0 \frac{1}{r} \frac{d}{dr}\left(r \frac{dt}{dr}\right), \qquad (100)$$

где

λ_0—коэффициент теплопроводности сегнетокерамики;
$P_{a.\,уд}$—мощность, выделяющаяся в единице объема.

Обозначив наибольшую температуру на оси столбика через

$t_м$, найдем температуру внутри столбика из керамических дисков на расстоянии r:

$$t = t_m - \frac{P_{a.уд}}{4\lambda_0} r^2. \qquad (101)$$

Для перепада температур в сегнетокерамическом столбике Δt_0 найдем

$$\Delta t_0 = \frac{P_{a.уд}}{4\lambda_0} r_0^2, \qquad (102)$$

где r_0—радиус диска.

Перейдем к определению перепада температур в слое изоляции (масло и т. п.), отделяющем диски от корпуса. В изолирующей прослойке, окружающей столбик, и в стенке корпуса имеет место теплопередача при условии $P_{a.уд}=0$, мощность в них не выделяется, количество входящего тепла равно количеству выходящего. В этом случае можно использовать следующее равенство, аналогичное закону Ома:

$$-dt = P' dR_T, \qquad (103)$$

где

dR_T—тепловое сопротивление элементарного слоя толщиной dr;

P'—мощность, проходящая в виде тепла через слой;

dt—перепад температур в этом слое.

Описав окружность радиусом r ($r_0 \leqslant r \leqslant r_1$), найдем перепад температур в цилиндрическом элементарном слое толщиной dr с коэффициентом теплопроводности λ_1 (фиг. 72, *б*)

$$-dt = P_{a.уд} \pi r_0^2 \frac{dr}{2\pi r \lambda_1}. \qquad (104)$$

Перепад температур в слое толщиной $r_1 - r_0$ обозначим через Δt_{01}:

$$\Delta t_{01} = \frac{P_{a.уд} r_0^2}{2\lambda_1} \int_{r_0}^{r_1} \frac{dr}{r} = \frac{P_{a.уд} r_0^2}{2\lambda_1} \ln \frac{r_1}{r_0}, \qquad (105)$$

где λ_1 коэффициент теплопроводности изоляции, окружающей столбик из дисков.

Аналогично найдем перепад температур в стенке корпуса Δt_{12}, обозначив через λ_2 коэффициент теплопроводности материала корпуса

$$\Delta t_{12} = \frac{P_{a.уд} r_0^2}{2\lambda_2} \ln \frac{r_2}{r_1}. \qquad (106)$$

Перепад температур на наружной поверхности корпуса $\Delta t_{2ср}$, т. е. разность температур между температурой наружной

поверхности корпуса и температурой $t_{ср}$ окружающей среды, определим из условия [см. формулу (89)]

$$P_{а.\,уд}\pi r_0^2 l=\sigma S'_{ох} l\,\Delta t_{2ср}, \qquad (107)$$

где $S'_{ох}=2\pi r_2$—поверхность охлаждения на единицу длины l

$$\Delta t_{2ср}=\frac{P_{а.\,уд} r_0^2}{2r_2\sigma}. \qquad (108)$$

Разность между температурой $t_м$ на оси столбика и температурой $t_{ср}$ окружающей среды для краевого расположения выводов

$$\Delta t_{м.\,ср}=\Delta t_0+\Delta t_{01}+\Delta t_{12}+\Delta t_{2ср}; \qquad (109)$$

$$\Delta t_{м.\,ср}=\frac{P_{а.\,уд} r_0^2}{2}\left(\frac{1}{2\lambda_0}+\frac{1}{\lambda_1}\ln\frac{r_1}{r_0}+\frac{1}{\lambda_2}\ln\frac{r_2}{r_1}+\frac{1}{r_2\sigma}\right). \qquad (110)$$

Полученное выражение может быть использовано и в том случае, если конденсатор не заключен в корпус, а покрыт слоем компаунда; в этом случае значение коэффициента теплопроводности материала корпуса λ_2 следует положить равным бесконечности, а коэффициент теплоотдачи σ выбрать в соответствии с условиями теплопередачи от компаунда к воздушной среде. Тогда будем иметь

$$\Delta t_{м.\,ср}=\frac{1}{2}P_{а.\,уд} r_0^2\left(\frac{1}{2\lambda_0}+\frac{1}{\lambda_1}\ln\frac{r_1}{r_0}+\frac{1}{r_1\sigma}\right). \qquad (111)$$

В формулу для полного перепада температур входит величина удельных потерь $P_{а.\,уд}$, которая в свою очередь зависит от температуры. Поэтому приходится вначале задаваться средней температурой керамики t' и по ней находить величины $\varepsilon_э$ и $\operatorname{tg}\delta_э$, входящие в выражение удельных потерь [формула (96)].

Поскольку величины $\varepsilon_э$ и $\operatorname{tg}\delta_э$ зависят также от градиента и частоты, то необходимо знать рабочую частоту и градиент поля E. Величину градиента поля часто выбирают из соображения получения требуемых сегнетоэлектрических свойств (см. ниже); в этом случае тепловой расчет служит проверкой допустимости использования выбранной величины E по условиям теплопередачи.

В основу определения $\varepsilon_э$ и $\operatorname{tg}\delta_э$ можно положить экспериментальные зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь от температуры, снятые при различных градиентах электрического поля (например фиг. 20, *а*) и при заданной частоте f. Диэлектрическая проницаемость при температурах значительно выше точки Кюри не зависит от градиента поля, однако значение $\operatorname{tg}\delta_э$ обычно возрастает при увеличении градиента E.

Найдя по температурным зависимостям $\varepsilon_э$ и $\operatorname{tg}\delta_э$ эти величины, вычисляют перепады температуры. Значения коэффициентов теплопроводности представлены в табл. 4. Температура $t_{ср}$ окружающей среды (наибольшая) обычно известна и тогда наибольшая температура сегнетокерамики

$$t_м = t_{ср} + \Delta t. \qquad (112)$$

Средняя температура сегнетокерамики

$$t' = t_м - \frac{\Delta t_0}{2}. \qquad (113)$$

Если эта температура отличается от исходной на значительную величину ($\sim 10°$ С), расчет повторяют, задаваясь другой температурой t''.

Допустимую величину температуры в керамике $t_м$ выбирают, сообразуясь с назначением и условиями работы конденсатора, с одной стороны, и температурными зависимостями главнейших параметров, с другой. Для конденсаторов блокировочных и разделительных в первую очередь следует принимать во внимание уменьшение емкости при переходе через точку Кюри; для нелинейных конденсаторов—снижение параметров нелинейности при чрезмерном повышении температуры.

Заметим, что в известных пределах можно регулировать перепад температур Δt путем конструктивных изменений—изменения числа дисков из сегнетокерамики на единицу высоты, применения ребер, использования дутья и т. п. Величина градиента поля, допустимого по условиям теплопередачи, входит в формулы перепада температуры. Если перепад температур

Таблица 4

Коэффициенты теплопроводности некоторых материалов

Наименование	Коэффициент теплопроводности $\lambda \cdot 10^4$ *вт/см·град*	Наименование	Коэффициент теплопроводности $\lambda \cdot 10^4$ *вт/см·град*
Алюминий при 18° С	21 000	Парафин	30...39
при 100° С	20 400	Радиофарфор	150
Битум (температура размягчения 125° С)	14	Радиостеатит	200
Воздух при 0° С	2,33	Слюда мусковит	40...48
при 100° С	3,00	Стеатит	160...180
Латунь при 0° С	8050	Тиконд	300
при 100° С	10 600	Титанат бария	240
Масло минеральное при 20° С	15,0...16,4	Ультрафарфор	500
Масло минеральное при 90° С	20,9...21,0	Фарфор	130...160
Масло трансформаторное	12,0...13,7	Фенолформальдегидная пластмасса	18
Медь при 0° С	38 400	Эбонит	16

для исходных условий оказывается недопустимо большим, приходится снижать величину градиента E и проводить поверочный расчет для новых значений E, $\varepsilon_э$ и $\operatorname{tg} \delta_э$.

Следует сказать, что в рассмотренных расчетах теплопередачи герметизированного конденсатора значение перепада температур оказывается несколько выше действительного, так как не принят во внимание отвод тепла через крышку конденсатора. Кроме того, необходимо иметь в виду разброс определяемых значений $\varepsilon_э$ и $\operatorname{tg} \delta_э$, имеющий место на практике, а также наличие ряда допущений в расчете. Поэтому необходимо результаты расчета проверять опытным путем на экспериментальном образце конденсатора.

28. Напряжение конденсатора, отвечающее требуемым сегнетоэлектрическим свойствам

Наиболее важным условием, определяющим величину рабочего напряжения сегнетоконденсатора, является получение необходимых сегнетоэлектрических свойств. Путем надлежащего выбора напряжения можно обеспечить высокую емкость или большой поток индукции, или сильную нелинейность, или же другие выраженные свойства. При надлежащей напряженности поля удается добиться преобладания одних свойств над другими, причем именно тех, которые имеют наибольшее значение для благоприятного использования данной сегнетокерамики в электротехническом устройстве. Эти свойства также тесно связаны с составом и технологией изготовления сегнетокерамики. Таким образом, для различных областей применения предназначаются, как правило, соответствующие виды сегнетокерамики и подбираются соответствующие градиенты поля. Следует отметить, что даже если приходится ограничиваться одним видом керамики, то при определенном градиенте поля (а также определенной температуре) можно получить одну из характеристик, выраженную ярче других. Ограничимся рассмотрением влияния напряжения на емкость, поток индукции и нелинейность конденсатора.

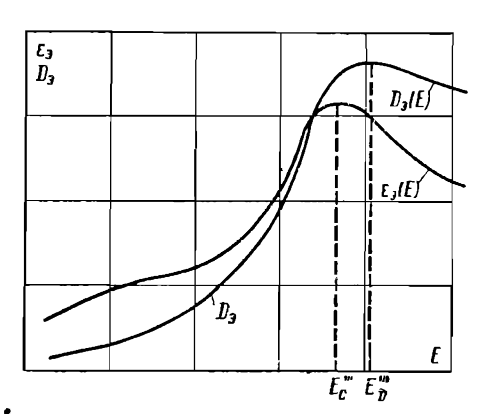
Эффективная емкость сегнетоконденсатора будет наибольшей при наивысшей эффективной диэлектрической проницаемости; эта проницаемость при данной температуре имеет высокое значение в определенном интервале градиентов поля (фиг. 73). Таким образом, наибольшей емкости соответствует градиент E_c'''; эта величина имеет существенное значение для сегнетоконденсаторов с высокой удельной емкостью. Поток электрической индукции сегнетоконденсатора будет наибольшим при наивысшей эффективной индукции $D_э$.

Если воспользоваться соотношением

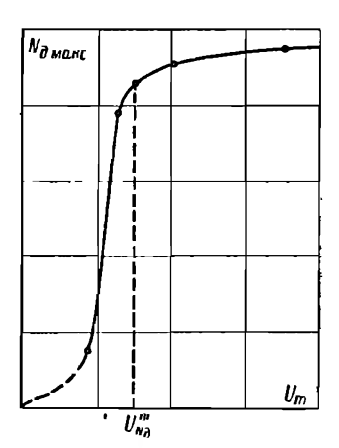
$$D_э = \varepsilon_э E,$$

то на основании зависимости $\varepsilon(E)$ можно построить график $D_э(E)$ (фиг. 73), из которого видно, что наибольшее значение смещения $D_э$ соответствует более высокому градиенту поля $E'''_Д$, чем наибольшее значение диэлектрической проницаемости. Градиент $E'''_Д$ имеет существенное значение для емкостных генераторов и некоторых других устройств.

Эффективная нелинейность сегнетоконденсатора будет наибольшей при напряжении $U'''_{Nэ}$, которому соответ-



Фиг. 73. Зависимости диэлектрической проницаемости и индукции от напряженности поля для титаната бария с добавками; $t = 20°$ C; $f = 50$ *гц*



Фиг. 74. Зависимость наибольшей дифференциальной нелинейности сегнетоконденсатора от амплитуды напряжения для титаната бария с добавками; $t = 20°$ C

ствует градиент поля $E'''_{Nэ}$ (фиг. 8). Эта величина меньше градиента, отвечающего максимальной эффективной диэлектрической проницаемости; величина градиента $E'''_{Nэ}$ имеет существенное значение для сегнетоконденсаторов, используемых в емкостных стабилизаторах, бесконтактных выключателях и т. п.

Дифференциальная нелинейность сегнетоконденсатора изменяется при изменении напряжения в пределах периода колебаний переменного тока (фиг. 8). При возрастании амплитуды напряжения будет увеличиваться дифференциальная емкость. Если по оси абсцисс откладывать амплитуды напряжения, а по оси ординат—наибольшие значения дифференциальной нелинейности, то можно установить, что дифференциальная нелинейность возрастает при увеличении приложенного напряжения. Однако, начиная с некоторого напряжения $U'''_{Nд}$ (фиг. 74) рост нелинейности сильно замедляется. Этому напряжению будет соответствовать напряженность $E'''_{Nд}$. Дальнейшее повы-

шение напряжения сопровождается менее заметным возрастанием наибольшей нелинейности, но вместе с тем приводит к сильному увеличению потерь, пропорциональных квадрату напряжения и, следовательно, к увеличению количества тепла, выделяющегося в конденсаторе. Использование более низких значений E сопровождается уменьшением наибольшей нелинейности. Таким образом, величина напряженности $E'''_{N\partial}$ устанавливается путем анализа ряда вариантов и представляет компромисс между требованием наибольшей нелинейности и требованием наименьших потерь в конденсаторе. Величина $E'''_{N\partial}$ имеет существенное значение для сегнетоконденсаторов, используемых в емкостных усилителях и других видах аппаратуры.

Подводя итог сказанному о выборе напряжения сегнетоконденсатора можно придти к следующим выводам. Напряжение в первую очередь определяется напряженностью поля $E_{сегн}$, отвечающей требуемым сегнетоэлектрическим свойствам, причем номинальное напряжение должно соответствовать этой напряженности:

$$U_н = E_{сегн} h, \qquad (114)$$

где h—толщина керамики (в плоском конденсаторе).

Полученная величина напряжения должна быть проверена на соответствие условиям электрической прочности и условиям нагревания конденсатора, что может быть сделано уже на основе установленной конструкции конденсатора.

29. Емкость и потери конденсатора

Величина емкости линейного конденсатора представляет функцию его геометрических размеров и диэлектрической проницаемости. В случае нелинейного конденсатора его эффективная емкость является функцией также и напряжения, поскольку диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_э$ изменяется при изменении напряженности поля E. В качестве исходной зависимости, полученной опытным путем, возьмем зависимость диэлектрической проницаемости $\varepsilon_э$ от напряженности поля, снятую при заданных температуре и частоте f. Пользуясь этой кривой, рассчитаем эффективную емкость конденсатора низкого напряжения.

Емкость плоского конденсатора выражается следующим образом:

$$C = \frac{\varepsilon_э \varepsilon_0 S}{h} \ [ф], \qquad (115)$$

где

S—площадь обкладки в плоском конденсаторе;

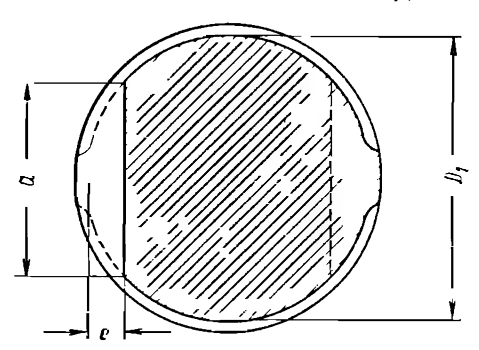
h—толщина керамики; все размеры выражаются в метрах;

диэлектрическая постоянная

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \; [\text{ф/м}]. \qquad (116)$$

Если емкость выразить в пикофарадах (1 *пф* $=10^{-6}$ *мкф* $=10^{-12}$ *ф*), а размеры — в сантиметрах, то после преобразований емкость плоского сегнетоконденсатора

$$C_э = \frac{\varepsilon_э S}{3{,}6\pi h} \; [\text{пф}]; \qquad (117)$$



Фиг. 75. К расчету емкости элемента многодискового конденсатора

часто плоский конденсатор имеет форму диска диаметром D_2, причем электрод имеет диаметр D_1;

тогда

$$C_{э1} = \frac{\varepsilon_э D_1^2}{14{,}4h} \; [\text{пф}]. \qquad (118)$$

Удельная емкость, т. е. емкость в единице объема в случае плоского негерметизированного конденсатора, выражается следующим образом:

$$C_{уд} = \frac{\varepsilon_э \varepsilon_0 S}{hSh} = \frac{\varepsilon_э \varepsilon_э}{h^2} \qquad (119)$$

Выражая емкость в пикофарадах, а толщину керамики в сантиметрах, получим

$$C_{уд} = \frac{\varepsilon_э}{3{,}6\pi h^2} \; [\text{пф/см}^3]. \qquad (120)$$

В случае использования диска в конденсаторе блочного типа с краевым расположением выводов емкость несколько уменьшается (фиг. 75) за счет снижения активной площади электрода; емкость одного элемента

$$C_{э1} = \frac{\varepsilon_э D_1^2}{14{,}4h} - \frac{\varepsilon_э}{3{,}6\pi h} \cdot \frac{2e}{15}(6a + 8b) =$$

$$= \frac{\varepsilon_э}{h}\left[0{,}0695 D_1^2 - 0{,}0236 e (3a + 4b)\right] \; [\text{пф}], \qquad (121)$$

где

$$b = \frac{1}{2}\sqrt{4h^2 + a^2}.$$

Расчет емкости ц и л и н д р и ч е с к о г о сегнетоконденсатора осложняется тем, что напряженность поля изменяется вдоль радиуса.

Емкость цилиндрического линейного конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 2\pi l}{\ln\frac{d_2}{d_1}}, \qquad (122)$$

где

l—длина активной части электрода в цилиндрическом конденсаторе;

d_1 и d_2—соответственно внутренний и наружный диаметры цилиндра.

Если емкость выразить в пикофарадах, а размеры в сантиметрах, то

$$C = \frac{\varepsilon l}{1{,}8\ln\frac{d_2}{d_1}}\ [\mathit{пф}]. \qquad (123)$$

Если разложить в ряд $\ln\frac{d_2}{d_1} = \ln\left(1 + \frac{2h}{d_1}\right)$ и ограничиться первым членом разложения, то емкость цилиндрического линейного конденсатора

$$C \approx \frac{\varepsilon l d_1}{3{,}6h}, \qquad (124)$$

где h—толщина стенки трубки [*см*].

Погрешность, имеющая место при пользовании этим приближенным выражением для емкости цилиндрического конденсатора, не превосходит 1%, если толщина стенки трубки $h \leqslant 0{,}01d_1$, и не превосходит 10%, если $h \leqslant 0{,}12d_1$.

Удельная емкость цилиндрического конденсатора выражается следующим образом:

$$C_{уд} = \frac{\varepsilon l}{0{,}45\pi d_2^2 l_к \ln\frac{d_2}{d_1}}, \qquad (125)$$

где

$l_к$—длина конденсатора;

l—длина активной части электрода ($l_к > l$).

Когда толщина диэлектрика h мала по сравнению с диаметром цилиндра d_1, а длина конденсатора $l_к$ мало отличается от l_1—может быть введено приближенное выражение

$$C_{уд} \approx \frac{\varepsilon l d_1}{3{,}6h\frac{\pi d_2^2}{4}l_к} = \frac{\varepsilon_э l}{0{,}9\pi l_к h(d_1 + 2h)}. \qquad (126)$$

Приведенные соотношения могут применяться лишь для ориентировочной оценки емкости сегнетоконденсаторов, так как

диэлектрическая проницаемость в цилиндрическом сегнетоконденсаторе изменяется вдоль радиуса вследствие изменения градиента поля.

Пренебрегая потерями и обозначая через R_1 и R_2—внутренний и наружный радиусы трубки и через $\gamma=\frac{Q}{l}$—заряд на единицу длины трубки, проведем радиусом r $(R_1 \leqslant r \leqslant R_2)$ цилиндрическую поверхность длиной $l=1$ и найдем поток вектора смещения сквозь эту поверхность

$$\varepsilon_э\varepsilon_0 E\cdot 2\pi r=\gamma. \qquad (127)$$

Допустим, что рабочий участок кривой $\varepsilon_э(E)$ может быть выражен прямолинейной зависимостью:

$$\varepsilon_э=A+BE. \qquad (128)$$

Подставив это выражение в (127), получим

$$BE^2+AE-\frac{\gamma}{2\pi\varepsilon_0 r}=0. \qquad (129)$$

Отсюда

$$E=-\frac{A}{2B}+\frac{1}{2Br}\sqrt{A^2r^2-4\frac{\gamma r}{2\pi\varepsilon_0}B}\,. \qquad (130)$$

Напряжение на зажимах конденсатора

$$U=\int_{R_1}^{R_2}E\,dr=-\int_{R_1}^{R_2}\frac{A}{2B}dr+\int_{R_1}^{R_2}\frac{\sqrt{A^2r^2-\frac{2\gamma r}{\pi\varepsilon_0}B}}{2Br}dr.$$

После интегрирования получаем

$$U=-\frac{A}{2B}(R_2-R_1)+\frac{1}{2B}\sqrt{R_2\left(A^2R_2+\frac{2B\gamma}{\pi\varepsilon_0}\right)}-$$

$$-\frac{1}{2B}\sqrt{R_1\left(A^2R_1+\frac{2B\gamma}{\pi\varepsilon_0}\right)}+$$

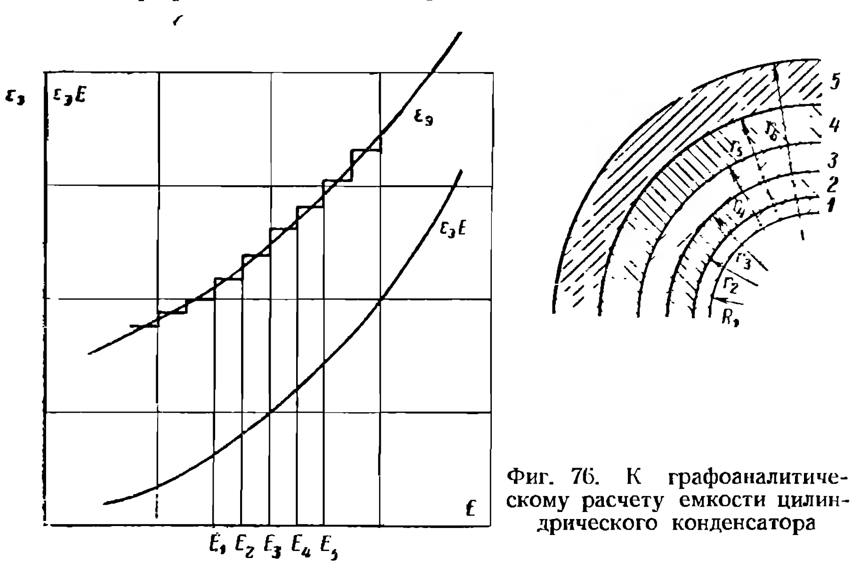
$$+\frac{2\gamma}{\pi\varepsilon A}\ln\frac{\left(\sqrt{R_2+\frac{2B\gamma}{A\pi\varepsilon_0}}+\sqrt{R_2}\right)\left(\sqrt{R_1+\frac{2B\gamma}{A\pi\varepsilon_0}}-\sqrt{R_1}\right)}{\left(\sqrt{R_2-\frac{2B\gamma}{A\pi\varepsilon_0}}-\sqrt{R_2}\right)\left(\sqrt{R_1+\frac{2B\gamma}{A\pi\varepsilon_0}}+\sqrt{R_1}\right)}. \qquad (131)$$

Задаваясь значением γ—заряда на единицу длины, находят напряжение U; если оно отличается от заданного, берут дру-

гое значение γ; после нескольких попыток определяют γ, отвечающее рабочему напряжению $U_н$, и емкость цилиндрического конденсатора на единицу длины:

$$C'_э = \frac{\gamma}{U}.$$

Ввиду громоздкости такого расчета целесообразно воспользоваться графоаналитическим приемом, основанным на замене



Фиг. 76. К графоаналитическому расчету емкости цилиндрического конденсатора

зависимости $\varepsilon_э(E)$ ступенчатой кривой. Тем самым расчет сводится к вычислению емкости многослойного конденсатора, у которого диэлектрическая проницаемость ε_k во всем слое номер k одинакова; при переходе к слою номер $k=1$ диэлектрическая проницаемость меняется скачком до значения ε_{k+1} [Л. 64]. Пользуясь кривой $\varepsilon_э(E)$, построим вспомогательную зависимость смещения $D_э = \varepsilon_э E$ от градиента E (фиг. 76). Для внутренней поверхности слоя k градиент

$$E_k = \frac{\gamma}{r_k 2\pi\varepsilon_k\varepsilon_0}. \qquad (132)$$

В частности для первого (внутреннего слоя)

$$E_1 = \frac{\gamma}{R_1 2\pi\varepsilon_1\varepsilon_0}. \qquad (133)$$

Заряд многослойного цилиндрического конденсатора на единицу длины

$$\gamma = \frac{2\pi U}{\frac{1}{\varepsilon_0}\sum_{k=1}^{k\ n} \frac{1}{\varepsilon_k} \ln \frac{r_{k+1}}{r_k}} = \frac{2\pi\varepsilon_0 U}{S}, \qquad (134)$$

где сумма

$$S = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{1}{\varepsilon_k} \ln \frac{r_{k+1}}{r_k}. \qquad (135)$$

Из (132) и (134) находим напряжение

$$U = \varepsilon_1 E_1 R_1 S \qquad (136)$$

и емкость конденсатора на единицу длины при этом напряжении

$$C'_э = \frac{2\pi\varepsilon_0}{S}. \qquad (137)$$

Сумму S удобно находить при помощи табл. 5; при этом на основании (132) отношение радиусов

$$\frac{r_{k+1}}{r_k} = \frac{\varepsilon_k E_k}{\varepsilon_{k+1} E_{k+1}}. \qquad (138)$$

Таблица 5

Определение суммы S для расчета емкости цилиндрического конденсатора

Номер ступени	ε	E		$\frac{1}{\varepsilon_k} \ln \frac{E_k}{E_{k+1}}$	$\sum \frac{1}{\varepsilon_k} \ln \frac{E_k}{E_{k+1}}$
1	ε_1	E_1	E_2	$\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{E_1}{E_2}$	$\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{E_1}{E_2}$
2	ε_2	E_2	E_3	$\frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{E_2}{E_3}$	$\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{E_1}{E_2} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{E_2}{E_3}$
—	—	—		—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
n	ε_n	E_n	E_{n+1}	$\frac{1}{\varepsilon_n} \ln \frac{E_n}{E_{n+1}}$	S

Учитывая, что для каждой „ступеньки“ $\varepsilon_k = \varepsilon_{k+1}$, получаем

$$\frac{r_{k+1}}{r_k} = \frac{E_k}{E_{k+1}}. \tag{139}$$

Тогда сумма

$$S = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{1}{\varepsilon_k} \ln \frac{E_k}{E_{k+1}}. \tag{140}$$

Начинаем суммирование, задаваясь значением E_1; заканчиваем суммирование при значении E_{n+1}, которое находим следующим образом. При $k = n + 1$ градиент

$$E_{n+1} = \frac{\gamma}{r_{n+1} 2\pi\varepsilon_{n+1}\varepsilon_0}. \tag{141}$$

Учитывая, что

$$r_{n+1} = R_2,$$

из (132) и (133) находим

$$\varepsilon_{n+1} E_{n+1} = \varepsilon_1 E_1 \frac{R_1}{R_2}; \tag{142}$$

по вспомогательной зависимости произведения $\varepsilon_э E$ от градиента E находим значение E_{n+1} для наружной поверхности последнего слоя. Суммирование заканчиваем членом

$$\frac{1}{\varepsilon_n} \ln \frac{E_n}{E_{n+1}}.$$

Если полученное значение напряжения не отвечает заданному, следует изменить E_1 (или R_1 и R_2). Этот метод, очевидно, может быть использован не только для прямолинейной, но и для любой зависимости $\varepsilon_э(E)$.

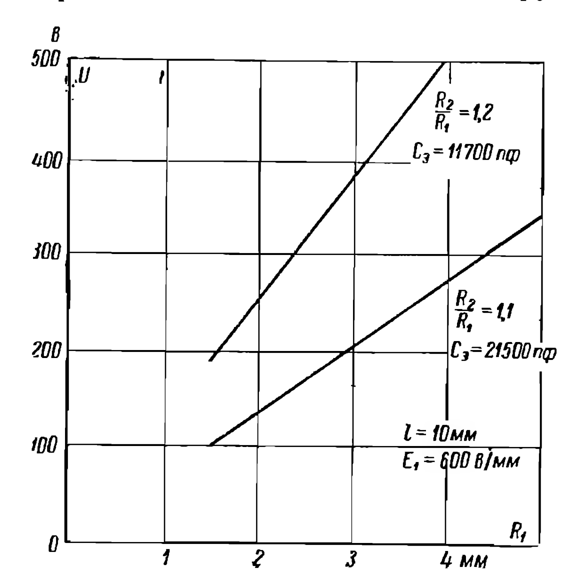
Рассчитаем, например, серию конденсаторов с различными радиусами R_1 из титаната бария для заданного градиента $E_1 = 600$ *в/мм* и $\frac{R_2}{R_1} = \text{const}$. При этом для известных значений E_1 и $\frac{R_2}{R_1}$ на основании графика $\varepsilon_э(E)$ и формулы (142) находим произведение $\varepsilon_{n+1} E_{n+1}$ и по вспомогательной кривой (фиг. 76) определяем E_{n+1}. Если $\frac{R_2}{R_1} = \text{const}$, то сумма S при этих условиях будет также постоянной, напряжение U будет линейной функцией радиуса R_1 (фиг. 77), ибо

$$U = S E_1 \varepsilon_1 R_1.$$

Все конденсаторы данной серии имеют одну и ту же емкость

$$C_э = \frac{2\pi\varepsilon_0 l}{S} = \text{const}.$$

Для предварительных расчетов пользуются приближенными формулами. При небольшой толщине h стенки трубки по срав-



Фиг. 77. Зависимости напряжения от радиуса R_1 цилиндрических конденсаторов при наибольшей напряженности $E_1 = 600$ *в/мм*

нению с диаметром d_1 эффективная емкость цилиндрического конденсатора может быть выражена согласно формуле (124)

$$C_э = \frac{\varepsilon_э l d_1}{3{,}6h}\ [пф];$$

все размеры подставляют в сантиметрах.

Значение диэлектрической проницаемости берут по кривой $\varepsilon_э(E)$, градиент E приближенно считают одинаковым в стенке трубки.

Удельные потери в случае плоского сегнетоконденсатора могут быть найдены в соответствии с формулой (51) (глава первая)

$$p_{а.уд} = 2\pi\varepsilon_э\varepsilon_0 f E^2 \operatorname{tg}\delta_э.$$

Если выразить E в *в/м*, $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi\cdot 9\cdot 10^9}$ *ф/м*, то мощность будет измеряться в *вт/м³*; если выразить E в *в/см*, $\varepsilon_0 =$

$= \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11}}$ *ф/см*, то выражение для удельной мощности примет вид:

$$p_{a.\,уд} = \frac{1}{1{,}8 \cdot 10^{12}} \varepsilon_э f E^2 \operatorname{tg} \delta_э \; [вт/см^3]. \qquad (143)$$

Значения $\varepsilon_э$ и $\operatorname{tg} \delta_э$ должны отвечать градиенту поля E и заданной температуре. Это же выражение с приближением используют и для цилиндрического конденсатора.

30. Нелинейность конденсатора

Эффективная нелинейность сегнетоконденсатора может быть определена расчетно-графическим путем, если известен график зависимости $\varepsilon_э(E)$. В случае плоского конденсатора эффективная нелинейность [глава первая, формула (24)]

$$N_э = \frac{1}{C_э} \frac{dC_э}{dU}.$$

Производная

$$\frac{dC_э}{dU} = \frac{\varepsilon_0 S}{h^2} \frac{d\varepsilon_э}{dE}.$$

Эффективная нелинейность

$$N_э = \frac{h}{\varepsilon_0 \varepsilon_э S} \frac{\varepsilon_0 S}{h^2} \frac{d\varepsilon_э}{dE} = \frac{1}{\varepsilon_э h} \frac{d\varepsilon_э}{dE}. \qquad (144)$$

Производная $\frac{d\varepsilon_э}{dE}$ может быть найдена графически, для чего следует провести касательную в данной точке кривой $\varepsilon_э(E)$ и найти тангенс угла θ между этой касательной и осью абсцисс

$$\frac{d\varepsilon_э}{dE} = \frac{m_\varepsilon}{m_E} \operatorname{tg} \theta, \qquad (145)$$

где m_ε и m_E—масштабы диэлектрической проницаемости $\varepsilon_э$ и градиента E. Таким образом, разделив напряжение конденсатора U на толщину керамики h, находят градиент E; зная E, находят по кривой $\varepsilon_э(E)$ соответствующие значения диэлектрической проницаемости $\varepsilon_э$ и производной $\frac{d\varepsilon_c}{dE}$; по формуле (144) вычисляют эффективную нелинейность.

При сравнительной оценке сегнетоконденсаторов зачастую определяют наибольшее значение эффективной нелинейности и соответствующее значение градиента поля E. Нетрудно заметить, что при прочих равных условиях эффективная нелинейность увеличивается обратно пропорционально толщине керамики. Эффективная нелинейность в случае многодискового

конденсатора не зависит от числа элементов. В случае цилиндрического конденсатора эффективная нелинейность, вычисленная тем же путем, будет отличаться от истинной, так как градиент E в диэлектрике меняется вдоль радиуса и отношение $\frac{U}{h}$ дает лишь усредненное значение градиента. Однако при малой толщине h по сравнению с диаметром нелинейность цилиндрического конденсатора с известным приближением определяют по этой же формуле.

Реверсивную нелинейность можно определить согласно формуле (27):

$$N_p = \frac{1}{C_p} \frac{dC_p}{dU}.$$

Раскрывая выражение реверсивной емкости, получаем

$$N_p = \frac{1}{\varepsilon_p h} \frac{d\varepsilon_p}{dE_=}. \tag{146}$$

Производная $\frac{d\varepsilon_p}{dE_=}$ может быть найдена графически аналогично изложенному выше, после чего может быть определено наибольшее значение нелинейности N_p.

Дифференциальная нелинейность сегнетоконденсатора может быть найдена расчетно-графическим путем по кривой диэлектрического гистерезиса $D(E)$, снятой для данного вида сегнетокерамики при заданной амплитуде градиента E_m.

Согласно формуле (25)

$$N_\partial = \frac{1}{C_\partial} \frac{dC_\partial}{du}.$$

Дифференциальная емкость в случае плоского конденсатора

$$C_\partial = \frac{dq}{du} = \frac{S}{h} \frac{dD}{dE}, \tag{147}$$

где E и D—мгновенные значения электрической индукции и градиента поля E.

Производная

$$\frac{dC_\partial}{du} = \frac{1}{h} \frac{dC_\partial}{dE} = \frac{S}{h^2} \frac{d^2D}{dE^2}. \tag{148}$$

Поэтому дифференциальная нелинейность

$$N_\partial = \frac{1}{h\frac{dD}{dE}} \frac{d^2D}{dE^2}. \tag{149}$$

По кривой диэлектрического гистерезиса или по идеальной кривой для ряда точек графически определяют первую производную; построив зависимость производной $\frac{dD}{dE}$ от градиента E, находят по этой зависимости для ряда точек вторую производную $\frac{d^2D}{dE^2}$; на основании полученных данных может быть построена зависимость нелинейности $N_д$ от градиента поля E и определено наибольшее значение $N_д$.

Нелинейность насыщения, представляя отношение максимальной дифференциальной емкости к минимальной, и к амплитуде U_m, определяется следующим выражением:

$$N_к = \frac{1}{U_m}\frac{C_{0д}}{C_{mд}} = \frac{1}{E_m h}\frac{\operatorname{tg}\theta_{макс}}{\operatorname{tg}\theta_{мин}}\left[\frac{1}{в}\right], \qquad (150)$$

где $\theta_{макс}$ и $\theta_{мин}$—максимальный и минимальный углы между касательными к кривой гистерезиса или к основной кривой цикла и осью абсцисс. Заметим, что изложенные основы выбора напряжения и расчета емкости и нелинейности сегнетоконденсатора позволяют получить результаты, имеющие характер первого приближения; их совершенно необходимо каждый раз корректировать путем всесторонних испытаний изготовленного образца конденсатора.

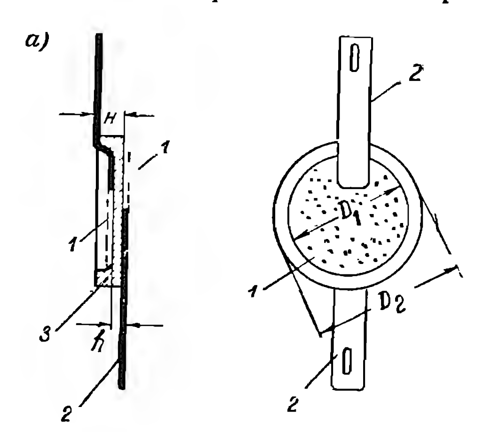
31. Конденсаторы одноэлементного типа

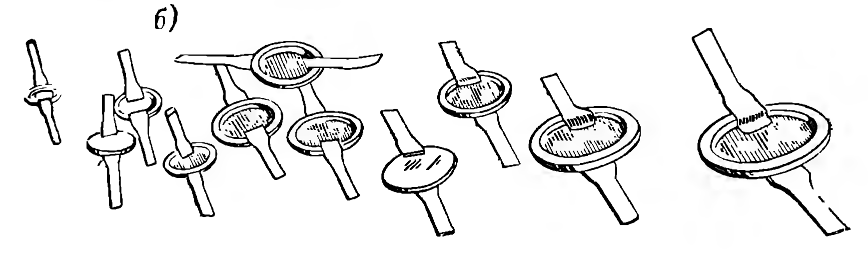
Вопросы конструкции сегнетоконденсаторов решаются в соответствии с выполняемой ими задачей в электротехническом или радиотехническом устройстве. Простейшим конструктивным типом конденсатора является диск или трубка. Первые сегнетоконденсаторы, которые по форме и конструкции копировали линейные керамические, появились в начале 1945 г. [Л. 23]. Это были негерметизированные конденсаторы, покрытые слоем органической эмали или компаунда.

Конденсаторы имели номинальную емкость 10^3—10^4 *пф*, причем удельная емкость таких конденсаторов составляла около 10 000 [*пф/см*^{3}].

Существенной особенностью сегнетоконденсатора в форме трубки или диска является то обстоятельство, что корона у краев электродов появляется при сравнительно невысоких напряжениях, особенно в условиях разреженной атмосферы и при повышенных частотах переменного тока. Для устранения короны приходилось увеличивать толщину диска, что вызывало уменьшение его емкости. Высокую емкость при отсутствии короны у краев можно обеспечить, используя конструкцию конденсатора с утолщенным краем; при такой конструкции можно добиться повышения напряжения короны (в особенности

при низких давлениях воздуха), уменьшения толщины диэлектрика, что приводит к увеличению удельной емкости, и существенного механического упрочнения конденсатора (фиг. 78). Благодаря утолщенному краю облегчается обжиг, диск меньше деформируется; если применить шлифовку для снижения толщины диэлектрика, то этот процесс становится проще, чем в случае плоских дисков; минимальная толщина диэлектрика не ограничивается условиями механической прочности. Сдвоенные конденсаторы с утолщенным краем могут иметь емкость до 100 000 *пф* и обладать значительной удельной емкостью. К недостаткам этой конструкции следует отнести более сложный процесс оформления заготовок, требующий применения осо-





Фиг. 78. Дисковые конденсаторы с утолщенным краем: *а* — одинарные, *б* — сдвоенные

1 — слой серебра; *2* — отвод; *3* — сегнетокерамика

бых прессформ или дополнительной механической обработки. Поэтому наряду с этим типом для невысоких напряжений применяют дисковые и трубчатые конденсаторы, покрытые термореактивным компаундом и эмалью. В некоторых случаях повышенная механическая прочность достигается путем опрессовки в пластмассу, причем также повышается напряжение перекрытия.

32. Конденсаторы блочного типа

Несмотря на высокое значение диэлектрической проницаемости сегнетокерамики ($\varepsilon_э > 1000$) изготовление из нее конденсатора емкостью порядка 1—5 *мкф* связано с большими трудностями, что отмечает ряд авторов (например [Л. 65], стр. 293).

Обычно, стремясь снизить толщину диэлектрика до минимума, придают керамическому конденсатору форму трубки с тем, чтобы конденсатор имел достаточную механическую прочность. Поиски решения задачи создания керамического конденсатора большой емкости ранее базировались на использовании трубчатой конструкции. Если обозначить отношение объема, занятого диэлектриком, к объему всего конденсатора через η, то для трубчатой конструкции

$$\eta=\frac{\pi\left(R_2^2-R_1^2\right)l}{\pi R_2^2 l}=1-\frac{1}{\left(1+\frac{h}{R_1}\right)^2}, \qquad (151)$$

где

R_2 и R_1—соответственно наружный и внутренний радиусы трубки;

l—ее длина;

h—толщина стенки.

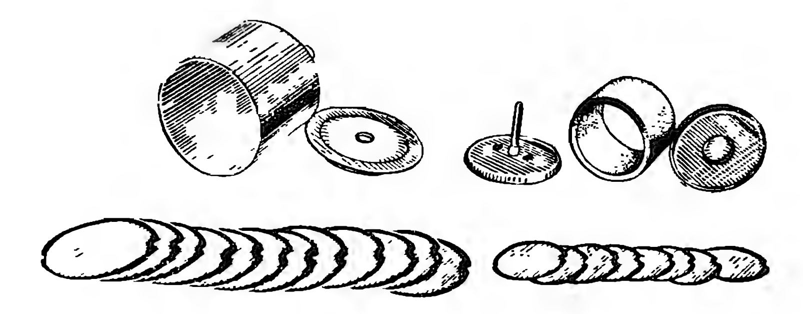
Значение η возрастает с уменьшением R_1, однако, уменьшая диаметр трубки, приходится из соображений прочности и условий технологии снижать и длину трубки; это ограничивает возможность получения значительной емкости в единице. При увеличении R_1 приходится по соображениям технологии керамики увеличивать толщину стенки h, вследствие чего снижается емкость конденсатора. Это видно из выражения (126) для удельной емкости, полученной из приближенной формулы (124) емкости цилиндрического конденсатора.

Коэффициент использования объема цилиндрического конденсатора η для распространенных значений $h=0{,}3$ *мм*, $R_1=2$ *мм* имеет небольшую величину $\eta=0{,}25$.

При уменьшении значения R_1 до 1,5 *мм* значение η составит 0,3, т. е. объем конденсатора используется примерно на $^1/_4$ или $^1/_3$, тогда как для плоского конденсатора значение $\eta\approx1$. Соединяя ряд трубок в параллель, получают конденсатор емкостью в несколько микрофарад; однако ввиду плохого использования объема удельная емкость оказывается ниже, чем для бумажных конденсаторов; по этим причинам блоки из трубок получили довольно ограниченное применение. Между тем благодаря высокому коэффициенту использования плоского конденсатора представляется возможным подойти к созданию керамического конденсатора большой емкости на базе многодисковой конструкции. По удельной емкости многодисковый сегнетоконденсатор превосходит бумагомасляный и металлобумажный конденсаторы, что объясняется использованием тонкослойной керамики с высоким значением $\varepsilon_э$.

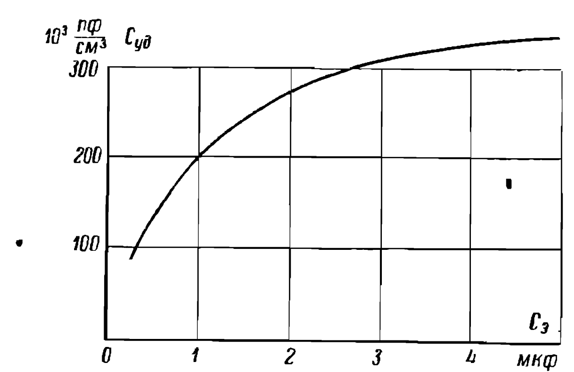
Конструкция многодискового конденсатора отличается наличием ряда дисков (фиг. 79), включенных параллельно при посредстве сборных шинок; столбик из дисков помещается

в герметический корпус, который заполняется изоляционной жидкостью; в случае керамической изоляции вакуумплотное соединение с выводами достигается путем пайки или сварки; возможно использование и пластмассовых изоляторов, обеспе-



Фиг. 79. Детали герметизированных конденсаторов до сборки

чивающих нагревостойкое вакуумплотное соединение с выводами. В ряде случаев при невысоких рабочих напряжениях и небольших значениях емкости блока, работающего в сравнительно легких условиях, ограничиваются защитой в виде слоя

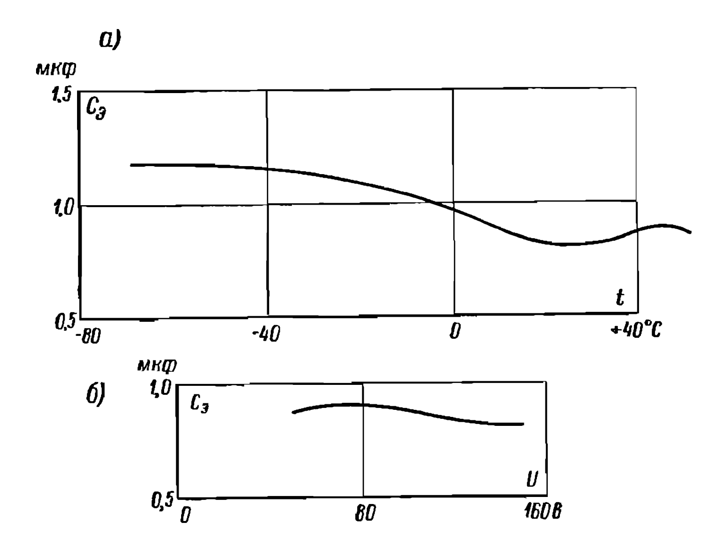


Фиг. 80. Зависимость удельной емкости одного из типов многодискового конденсатора низкого напряжения от его емкости; $t = 18°$ С, $f = 50$ *гц*

термореактивного компаунда и эмали. Емкость конденсатора блочного типа пока ограничивается величиной в несколько микрофарад. Получение более высоких емкостей связано с увеличением громоздкости и усложнением конструкции. Можно ожидать, что применение принципа, положенного в основу создания стеклоэмалевых конденсаторов [Л. 65] позволит получить сегнетоконденсаторы более высокой емкости. Удельная емкость многодисковых конденсаторов низкого напряжения достигает высоких значений (фиг. 80). Это объясняется кон-

структивными преимуществами блочной системы плоских конденсаторов, а также возможностью применения тонкослойной керамики (глава пятая), обладающей высокой диэлектрической проницаемостью.

Такие конденсаторы превосходят по удельной емкости бумагомасляные и металлобумажные конденсаторы. Так, при емкости $C_э=5$ *мкф* значение удельной емкости для многодискового сегнетоконденсатора составляет по меньшей мере



Фиг. 81. Изменения емкости и $\mathrm{tg}\,\delta_э$ одного из многодисковых конденсаторов: *а* — при изменении температуры, $U=118$ *в*; *б* — при изменении напряжения; $f=50$ *гц*, $t=22°$ С

0,33 *мкф/см*^{3}, тогда как для металлобумажного (типа КМБГ) той же емкости $C_{уд}=0{,}214$ *мкф/см*^{3}, а для бумагомасляного (типа КБГ) $C_{уд}=0{,}025$ *мкф/см*^{3}. Для конденсатора емкостью 0,5 *мкф* соответственно удельная емкость равна: сегнетоконденсатор (многодисковый)—0,135, металлобумажный — 0,085, бумагомасляный—0,019 *мкф/см*^{3}. Эти данные относятся к конденсаторам с номинальным напряжением около 120 *в*. В случае использования негерметизированных блоков, защищаемых только компаундом и эмалью, удельная емкость еще больше возрастает, благодаря отсутствию корпуса (глава шестая).

Температурные изменения емкости зависят от типа керамики и тесно связаны с величиной рабочего градиента поля. В одном из опытных конденсаторов емкостью в 0,75 *мкф* при возрастании температуры от —50° С до +60° С изменения емкости не превосходили ± 17% (фиг. 81); колебания напряжения от 80 до 140 *в* вызывают изменения емкости на ± 13%. Эти откло-

нения не выходят за пределы допусков для бумажных конденсаторов класса III (±20%).

Благодаря изменению со временем (после изготовления) диэлектрической проницаемости емкость конденсатора после окончания сборки несколько уменьшается (на 10 ... 15%), а потом при хранении в нормальных условиях остается неизменной. Если конденсатор нагреть, то его емкость после охлаждения окажется выше первоначальной и постепенно снизится до установившейся величины. При повышении приложенного напряжения наблюдаются аналогичные изменения. После снижения напряжения емкость вначале оказывается несколько больше первоначальной, а затем снижается до прежней величины. Заметим, что остаточные изменения являются временными и не превосходят величины порядка 10 ... 15%, т. е. они находятся в пределах интервала колебаний емкости при изменениях напряжения и температуры. Надо ожидать, что применение новых видов сегнетокерамики и дальнейшее усовершенствование технологии производства, обеспечивающее снижение толщины керамического диэлектрика, позволит еще больше повысить удельную емкость, а также улучшить и другие показатели конденсатора.

33. Помехозащитные конденсаторы

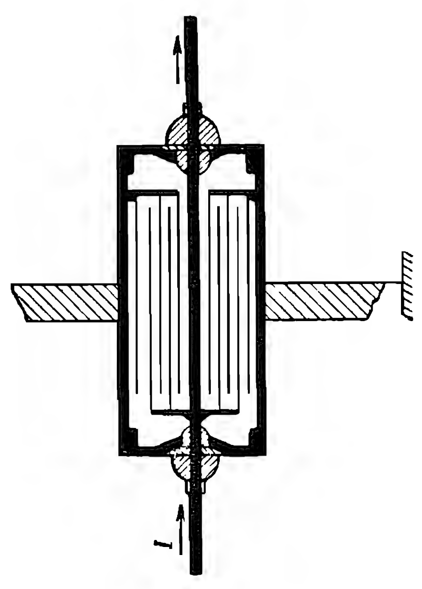
В соответствии с назначением и условиями работы сегнетоконденсатора его конструкция может претерпеть ряд изменений. Остановимся, например, на сегнетоконденсаторе, предназначенном для подавления помех радиоприему [Л. 66]. Эти помехи вызываются прерывателями, ионными приборами, системами зажигания двигателей внутреннего сгорания, электрическими машинами и другими промышленными устройствами. В большинстве случаев спектр частот помех захватывает широкий диапазон, начиная от длинных волн и кончая ультракороткими волнами.

Для подавления этих помех в последние годы широко применяются специальные конденсаторы, помещаемые на корпусе или в корпусе электротехнической установки и включаемые между каждым из выводов и корпусом. Обладая низким сопротивлением при высоких частотах, конденсатор представляет почти короткое замыкание для токов высокой частоты.

Конденсатор может иметь малое сопротивление при сверхвысоких частотах лишь в том случае, если его собственная индуктивность имеет ничтожную величину. С целью уменьшения индуктивности в современных бумажных конденсаторах, применяемых для подавления радиопомех, металлический корпус используется в качестве концентрического по отношению к конденсаторной секции обратного провода. В этих конденсаторах, называемых проходными, токоведущий стержень проходит

внутри конденсаторной секции. Одна система электродов секции конденсатора (применяют малоиндукционные секции со смятой и паянной по торцам фольгой) соединяется со стержнем, электроды другой полярности—непосредственно с корпусом конденсатора (фиг. 82).

Высокочастотной характеристикой конденсатора этого типа является зависимость его сопротивления связи от частоты f (фиг. 83). Сопротивление связи представляет отношение выходного напряжения конденсатора к его току на входе. Начиная с некоторой частоты, сопротивление связи после небольших колебаний начинает резко падать. Поэтому защитные свойства конденсатора с повышением частоты еще больше увеличиваются.



Фиг. 82. Схематический разрез бумажного проходного конденсатора

Керамический конденсатор для подавления помех собирается из дисков с бортиками, идущими по наружному краю и вокруг центрального отверстия (фиг. 84). Через это отверстие пропускается токоведущий стержень. Нижнюю и верхнюю поверхности диска покрывают, как обычно, серебром по методу вжигания. В дальнейшем один серебряный электрод припаивают к корпусу, а второй (на плоской поверхности диска) присоединяют при помощи лепестка из медной фольги к токоведущему стержню. Наличие бортиков позволяет повысить механическую прочность конденсатора, устранить его деформацию при обжиге и путем шлифовки плоской поверхности уменьшить толщину диэлектрика до желаемой величины. Емкость одного элемента можно определить по формуле

$$C_{э1} = \frac{\varepsilon_p\left(D_2^2 - D_1^2\right)}{14{,}4h}\ [пф], \qquad (152)$$

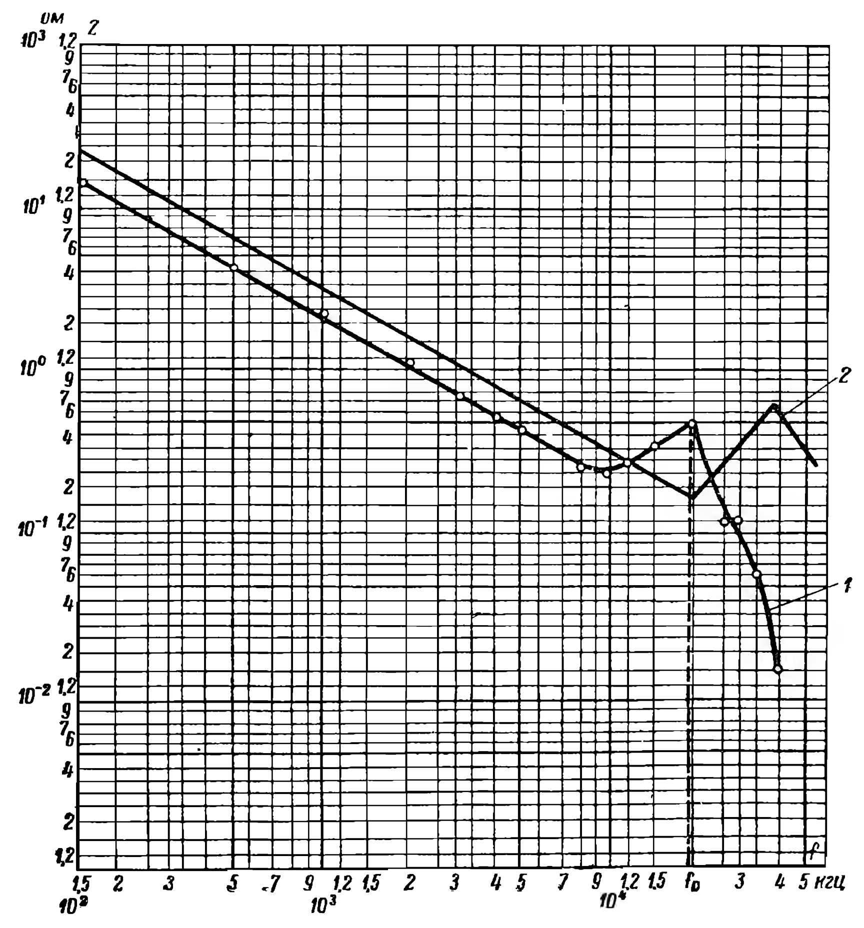
где

D_2 и D_1—диаметры (наружный и внутренний) кольцеобразной поверхности, покрытой серебром (фиг. 84);

h—толщина керамического диэлектрика.

В формулу подставляется реверсивная диэлектрическая проницаемость ε_p, поскольку к конденсатору помимо напряжения

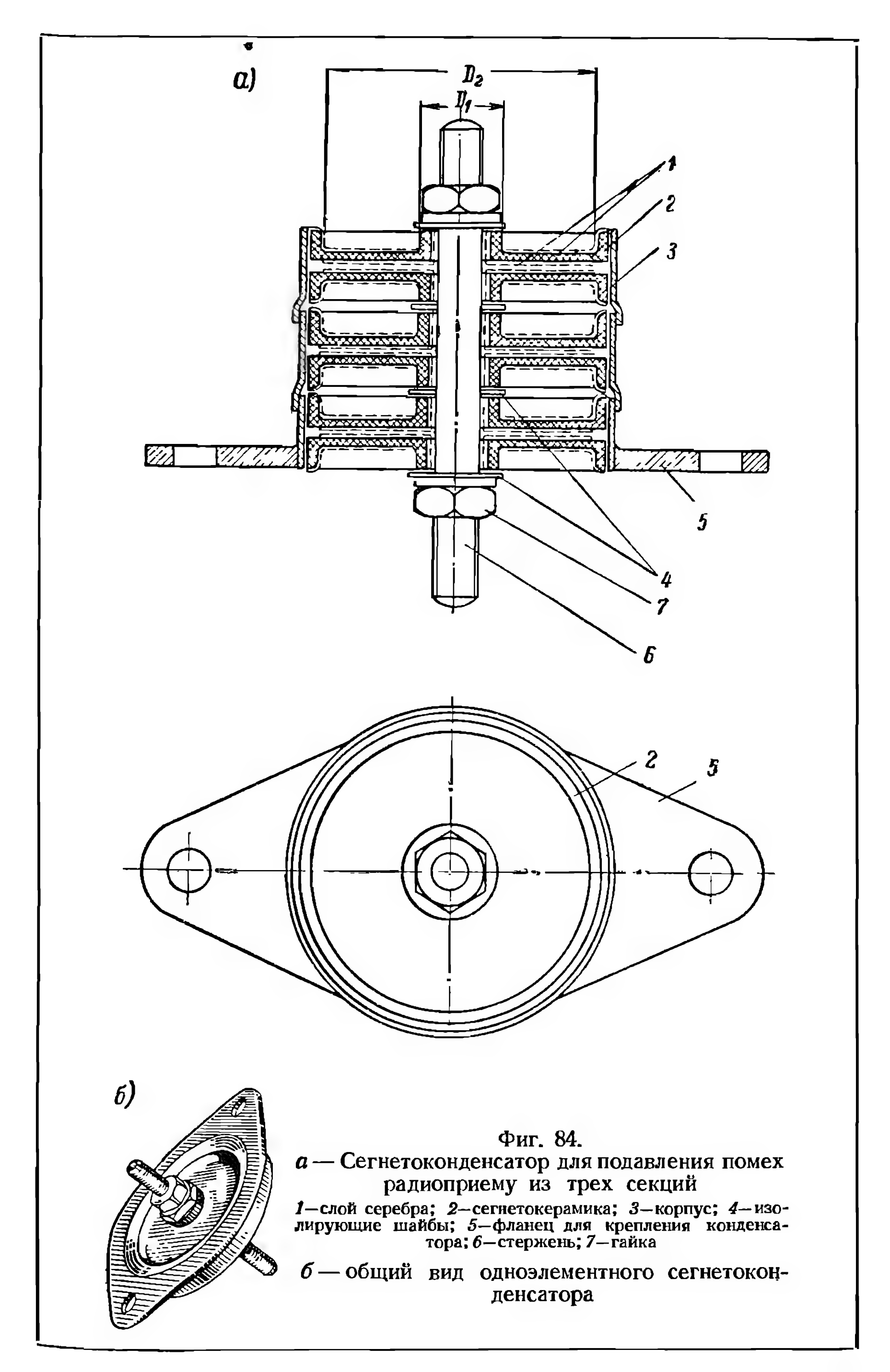
помех высокой частоты, прикладывается рабочее напряжение постоянного или переменного тока промышленной частоты; значение ε_p находят по градиентной зависимости (например см. фиг. 39, *в*) при температуре в рабочем интервале, отвечаю-



Фиг. 83. Частотная зависимость сопротивления связи
1—сегнетоконденсатор; *2*—бумажный проходной

щей наиболее низкому значению ε_p. При других температурах величина ε_p будет выше и, следовательно, защитный эффект конденсатора—больше. Емкость элемента при диаметре 35 *мм* может достигать 50 000 *пф*.

Конденсатор малой емкости может состоять из одного такого элемента, впаянного в корпус с фланцем (фиг. 84, *б*). Конденсаторы большей емкости содержат несколько секций, каждая из которых состоит из двух описанных элементов. Набрав

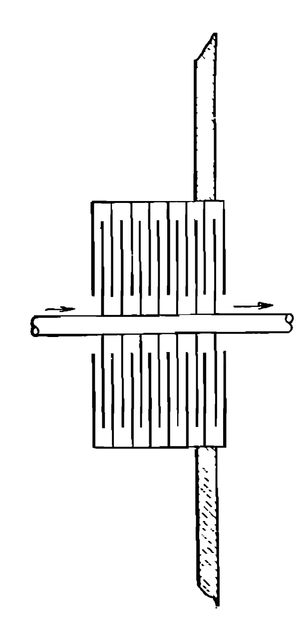


Фиг. 84.
а — Сегнетоконденсатор для подавления помех радиоприему из трех секций

1—слой серебра; *2*—сегнетокерамика; *3*—корпус; *4*—изолирующие шайбы; *5*—фланец для крепления конденсатора; *6*—стержень; *7*—гайка

б — общий вид одноэлементного сегнетоконденсатора

необходимое для получения заданной емкости число секций, закрепляют их при помощи двух гаек, после чего пропаивают соединение между корпусами секций. К одному из корпусов приварен фланец, с помощью которого конденсатор крепится в распределительной коробке электротехнического устройства.

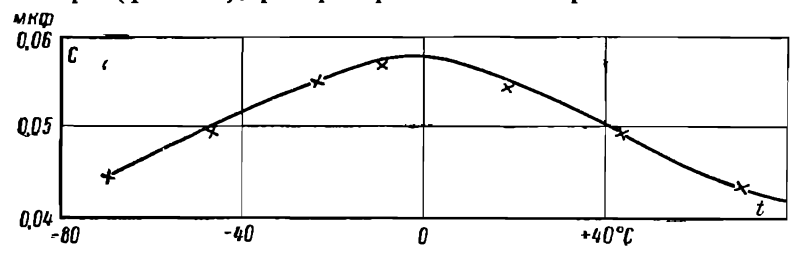


Фиг. 85. Схематический разрез многоэлементного сегнетоконденсатора для подавления помех

Благодаря высокой диэлектрической проницаемости сегнетокерамики емкость, приходящаяся на единицу площади обкладки, исключительно высока; для проходных сегнетоконденсаторов она имеет величину порядка 10 000 *пф/см*², в то время как для бумажных конденсаторов—величину порядка 250 *пф/см*².

В описанной конструкции не предусмотрена герметизация конденсатора, хотя она легко может быть выполнена с помощью плоских изоляторов из фарфора, одеваемых с двух сторон на токоведущий стержень: изоляторы должны быть припаяны или приварены к стержню и к корпусу конденсатора.

Частотная зависимость сопротивления связи (см. фиг. 83) имеет один и тот же характер как для проходного бумажного, так и для защитного сегнетоконденсатора. Конденсаторную секцию проходного бумажного конденсатора можно представить в виде системы концентрических цилиндров различного диаметра (фиг. 82); распространение электромагнитной волны



Фиг. 86. Температурная зависимость емкости одного из сегнетоконденсаторов для подавления помех

в проходном конденсаторе может рассматриваться как распространение вдоль оси лабиринта, образуемого этими цилиндрами; волна при этом сильно затухает. В случае сегнетоконденсатора

система его электродов представляет также лабиринт (фиг. 85); электромагнитная волна распространяется радиально по лабиринту, образуемому электродами. Применяя надлежащий вид керамики, обеспечивают при соответствующем градиенте E небольшое среднее отклонение емкости (фиг. 86) при изменении температуры от —60 до +85° С:

$$\Delta C_p \leqslant 18\%;$$

это отклонение укладывается в допуск для конденсаторов III класса. Сопротивление изоляции при нормальной температуре в сегнетоконденсаторах несколько ниже, чем в бумажных, а при верхней предельной температуре—выше примерно в два раза. Для емкости $C=0{,}2$ *мкф* $R_{из} \approx 1000$ *мгом.* Добротность при частоте 1000 *гц* для сегнетоконденсатора составляет около 25, а для проходного бумажного — 100 ($\operatorname{tg}\delta=0{,}01$). Заметим, однако, что при указанной величине добротности сегнетоконденсаторы с успехом могут быть использованы для защиты от помех, так как потери в них не сказываются на характеристиках защищаемого оборудования. Сегнетоконденсаторы могут заменить бумажные проходные, повидимому, в диапазоне от 0,025 до нескольких микрофарад. Дальнейшее увеличение емкости сопряжено с усложнением конструкции и вряд ли целесообразно.

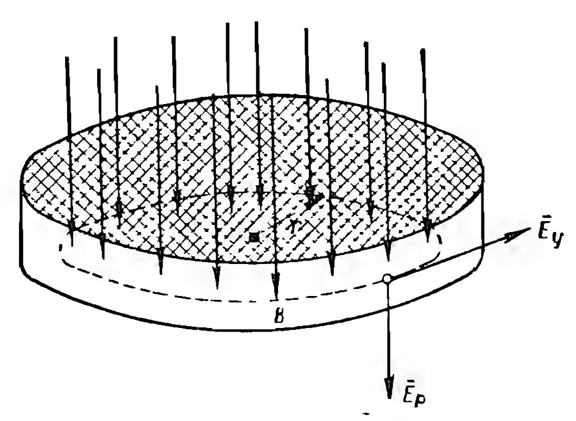
34. Сегнетоконденсаторы насыщения с поперечным полем

В нелинейном конденсаторе изменение емкости достигается изменением приложенного напряжения: эффективной емкости—при изменении напряжения основной частоты; реверсивной емкости—при изменении напряжения постоянного тока или напряжения, частота которого много ниже основной, причем оба напряжения должны быть приложены к электродам конденсатора. Необходимость изменения напряжения основной частоты для регулирования эффективной емкости или необходимость разделения цепей постоянного и переменного токов в случае управления реверсивной емкостью являются осложняющими факторами.

Отсутствие электрической или магнитной связи между управляющей и рабочей цепями имеет место в предложенных автором сегнетоконденсаторах насыщения, управляемых поперечным полем. Эти конденсаторы могут быть также названы магнитноуправляемыми, поскольку поперечное электрическое поле, направленное под прямым углом к основному рабочему полю, возбуждается с помощью переменного магнитного поля; изменяя ток в обмотке и меняя тем самым амплитуду переменного магнитного потока, осуществляют изменение параметров сегнетоконденсатора насыщения. Эти конденсаторы, благодаря сочетанию нелинейных свойств ферромагнетиков и сегнетоэлек-

триков, открывают собой совершенно новую область нелинейной техники с многообещающими инженерными применениями. Примером использования магнитноуправляемых конденсаторов может служить удвоение частоты [Л. 67). Ограничимся здесь рассмотрением некоторых вопросов конструкции и расчета конденсаторов.

Допустим, что диск из сегнетокерамики пронизывается магнитным потоком с индукцией B, изменяющимся со временем τ



Фиг. 87. Диск из сегнетокерамики в переменном магнитном поле

синусоидально: $B=B_m \cos \omega\tau$. В круговом контуре, описанном произвольным радиусом r (фиг. 87), в каждый момент времени τ при однородном поле индуктируется э. д. с.

$$e=-\frac{d\Phi}{d\tau}=B_m \cdot 2\pi f \pi r^2 \sin \omega\tau. \tag{153}$$

Градиент E_y этого электрического поля („управляющего") всегда направлен перпендикулярно градиенту E_p основного поля („рабочего"), обусловленного рабочим напряжением, приложенным к электродам диска. Градиент управляющего поля может быть найден из следующего соотношения

$$e=\oint \overline{E}_y d\overline{l}=E_y \cdot 2\pi r. \tag{154}$$

Используя формулу (153), получаем

$$E_y=\pi f r B_m \sin \omega\tau. \tag{155}$$

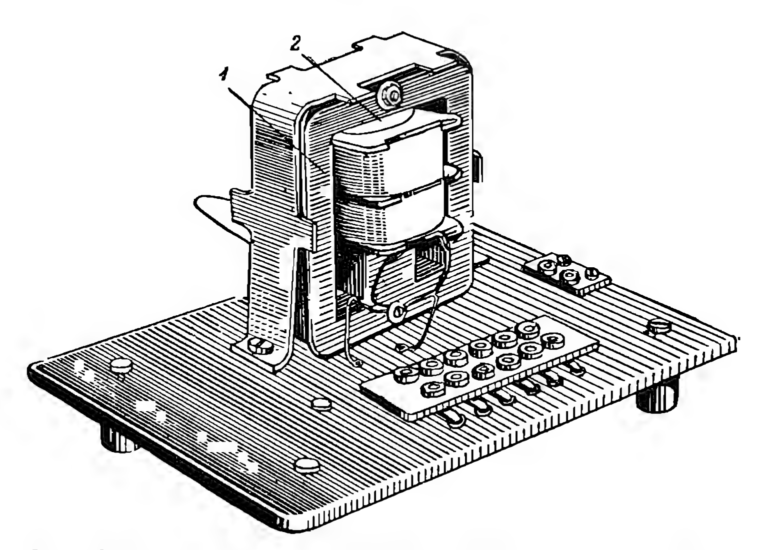
Наибольшее значение градиента

$$E_{ym}=\pi f r B_m. \tag{156}$$

Такой керамический диск может быть, например, помещен в воздушный зазор электромагнита (фиг. 88).

Если подобрать конфигурацию полюсных наконечников электромагнита такой, чтобы магнитное поле было неоднородным и изменялось бы вдоль радиуса по закону

$$B_r = \frac{B_m}{r+k}, \quad (k = \text{const}), \tag{157}$$



Фиг. 88. Магнитноуправляемый сегнетоконденсатор насыщения

1—магнитопровод; *2*—плоский сегнетоконденсатор с утолщенным краем, расположенный в воздушном зазоре

то градиент E_y при $r \gg k$ практически будет одинаковым во всем диске за исключением небольшой центральной области

$$E_y \approx \pi f B_m \sin \omega \tau. \tag{158}$$

Если бы рассматриваемый диск был выполнен не из сегнетокерамики, а из какого-нибудь линейного диэлектрика, то на процесс поляризации, вызываемой приложенным к электродам напряжением, поперечное поле E_y не сказывалось бы; диэлектрическая проницаемость, определяемая по величине емкости диска, не зависела бы ни от продольного E_p, ни от поперечного поля E_y. В случае сегнетокерамики диэлектрическая проницаемость изменяется при увеличении или уменьшении как продольного поля E_p, так и поперечного E_p. Измерения, проведенные автором, показали, что зависимости диэлектрической проницаемости от градиента у п р а в л я ю щ е г о поля E_y имеют такой же характер и почти совпадают в количественном отношении с результатами, получаемыми при изменении основ-

ного поля с градиентом E_p. Иными словами, в условиях заметного насыщения сегнетокерамики, когда явственно проявляется диэлектрический гистерезис, безразлично, изменяется ли рабочее поле (E_p) или перпендикулярное ему управляющее (E_y). Появившиеся позднее в литературе сообщения подтвердили наличие одинаковых градиентных зависимостей $\varepsilon_э$ и $\operatorname{tg} \delta_э$ как в случае управляющего, так и в случае рабочего полей [Л. 68].

Создание высоких магнитных индукций в магнитной системе с воздушным зазором затруднительно и требует большого числа ампервитков. Замкнутый магнитопровод без воздушных зазоров можно осуществить при условии, если сегнетоконденсатор будет иметь отверстие для магнитопровода (фиг. 89); чтобы избежать замыкания токов, наводимых в каждом электроде, последний выполняется не сплошным; на поверхности керамики оставляют полоску, не покрытую серебром. Ширина „s“ этой полоски должна быть такой, чтобы не возникало перекрытие или корона под воздействием управляющего поля. Кольцеобразный сегнетоконденсатор может надеваться на среднюю часть магнитопровода при его сборке [Л. 69].

Величина градиента управляющего поля может быть найдена для кольцеобразного конденсатора следующим образом. Магнитный поток, пронизывающий площадь поперечного сечения магнитопровода (фиг. 89),

$$\Phi = \frac{\pi D_0^2}{4} B_m \cos \omega\tau. \tag{159}$$

В контуре, описанном радиусом r $\left(\frac{D_2}{2} \leqslant r \leqslant \frac{D_1}{2}\right)$, индуктируется э. д. с.

$$e = -\frac{d\Phi}{d\tau} = \frac{2\pi^2 f D_0^2}{4} B_m \sin \omega\tau. \tag{160}$$

Градиент управляющего поля

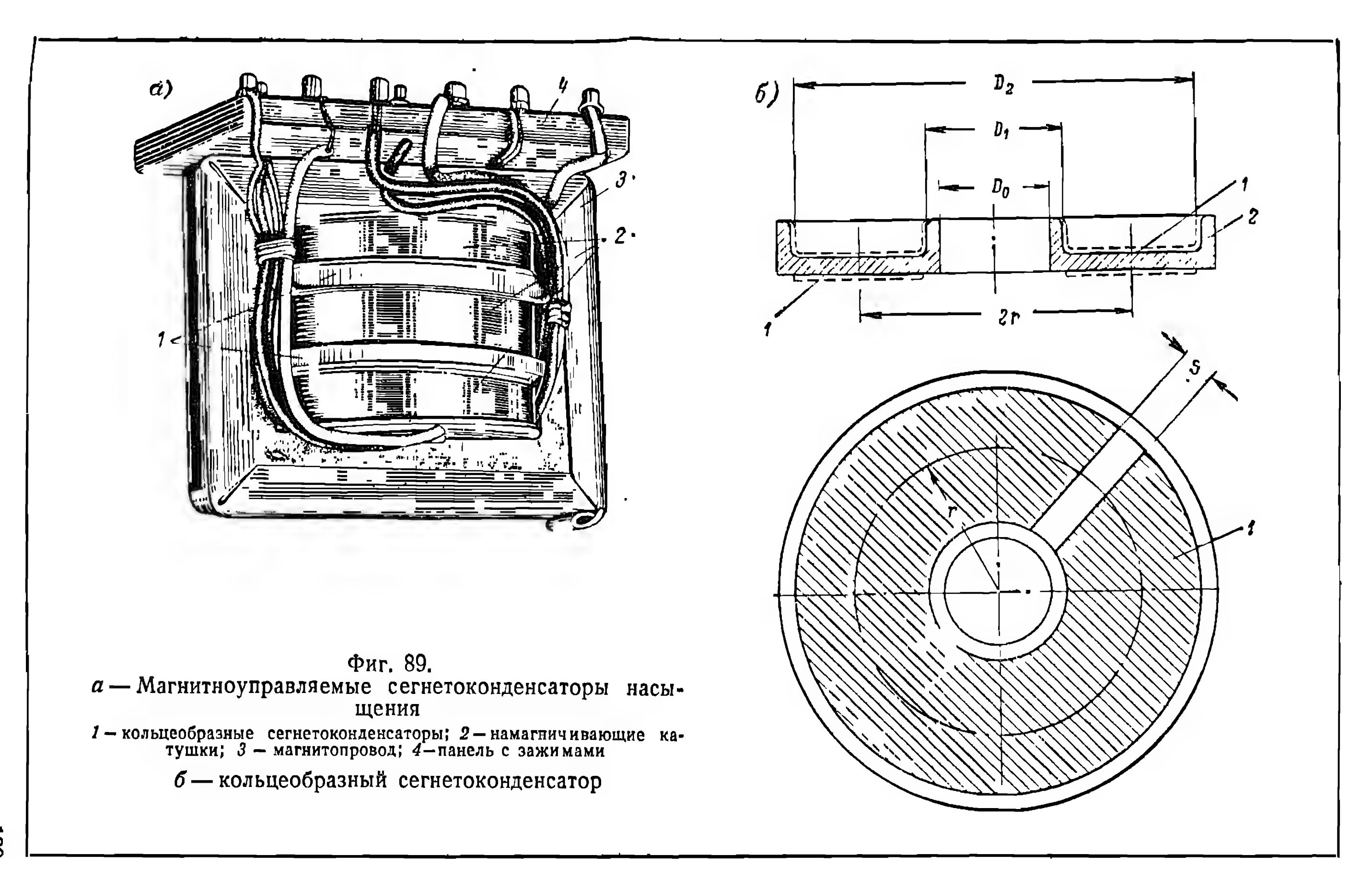
$$E_y = \frac{e}{2\pi r} = \frac{\pi f D_0^2}{4r} B_m \sin \omega\tau. \tag{161}$$

Наибольшее значение градиента

$$E_{ym} = \frac{\pi f D_0^2}{2D_1} B_m. \tag{162}$$

Эффективная емкость конденсатора при условии, что рабочее поле значительно слабее управляющего, может быть найдена следующим образом. Допустим, что зависимость $\varepsilon_э\,(E_y)$ для участка градиентной кривой может быть принята линейной

$$\varepsilon_э \approx a + bE_y.$$



Фиг. 89.

а — Магнитноуправляемые сегнетоконденсаторы насыщения

1 — кольцеобразные сегнетоконденсаторы; *2* — намагничивающие катушки; *3* — магнитопровод; *4* — панель с зажимами

б — кольцеобразный сегнетоконденсатор

Выделим часть диэлектрика в форме элементарного кольца (радиус кольца r, ширина dr).

Емкость кольцевого слоя

$$dC_э = \frac{\varepsilon_э 2\pi r\,dr}{3{,}6\pi h} = \frac{\varepsilon_э r\,dr}{1{,}8h}, \tag{163}$$

где

$$\varepsilon_э = a + bE_y = a + b\frac{\pi f D_0^2}{4r}B_э,$$

причем $B_э$—действующее значение индукции.

$$C_э = \int\limits_{\frac{D_1}{2}}^{\frac{D_2}{2}} \left(\frac{ar}{1{,}8h} + \frac{\pi b f D_0^2 B_э}{7{,}2h}\right) dr =$$

$$= \frac{D_2 - D_1}{14{,}4h}\left[a\left(D_2 - D_1\right) + b\pi f D_0^2 B_э\right]. \tag{164}$$

В этой формуле величины измеряют в следующих единицах: $C_э$—в *пф*; f—в *гц*; $B_э$—в *в·сек/см²*; коэффициент b—в *см/в*; размеры—в *см*.

Если зависимость диэлектрической проницаемости от градиента имеет сложный характер, емкость можно найти графоаналитически, для чего следует разбить всю поверхность электрода на ряд концентрических колец; найдя для каждого кольца средний градиент, вычисляют емкость кольца и затем суммируют полученные значения.

Глава пятая

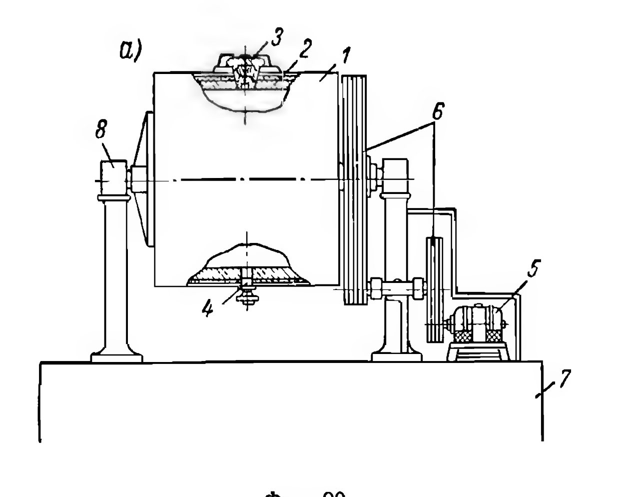
ИЗГОТОВЛЕНИЕ СЕГНЕТОКОНДЕНСАТОРОВ

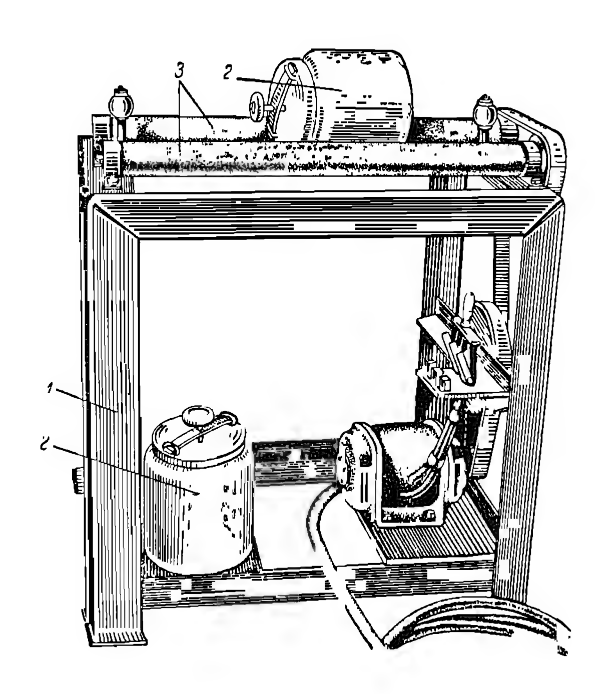
35. Общие данные о технологии производства керамических конденсаторов

В производстве линейных керамических конденсаторов используют как слабо пластичные массы, содержащие глину (например тиконд Т60), так и непластичные (стеатит, тиконд Т80), почти не содержащие глинистых веществ. Сегнетокерамические массы относятся к непластичным. Производство керамического конденсатора распадается на ряд этапов [Л. 70].

Подготовка сырьевых материалов заключается прежде всего в проверке соответствия паспорта на материал (на основе химического анализа) техническим условиям или ГОСТу. Затем некоторые материалы (например кусковой мрамор) дробятся, измельчаются, очищаются от ферромагнитных частиц и просеиваются через сито № 06 (по ГОСТ 3584-53, соответствует 144 *отв/см²*); другие предварительно обжигаются (двуокись титана, двуокись циркония—на 1300—1350° С), а потом также мелятся, очищаются магнитами и просеиваются; третьи сушатся при температуре 80—90° С (углекислый барий, углекислый стронций), после чего просеиваются; некоторые материалы не требуют предварительной обработки (например окись олова), так как они поступают в виде сухого, тонко измельченного химически чистого порошка, не содержащего органических примесей; иногда дополнительно производится очистка от ферромагнитных случайных примесей.

Помол массы производят в шаровой мельнице (фиг. 90), в которую загружают составленную по рецепту шихту. Материалы измельчаются шарами, которые при вращении мельницы поднимаются и падают вниз, причем происходит дробление и истирание материалов. Для помола керамической массы в качестве шаров используют либо обкатанную кремневую гальку, либо шары, изготовленные из керамики того же состава, что и обрабатываемая масса; это позволяет уменьшить количество примесей, попадающих в массу при помоле.





Фиг. 90.

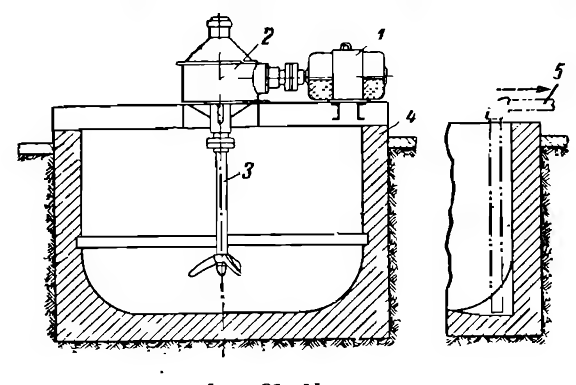
а — Шаровая мельница

1—барабан; *2*—футеровка; *3*—отверстие; *4* — выпускное отверстие; *5* — двигатель; *6* — привод; *7*—фундамент; *8*—станина

б — фарфоровые барабаны с вальцами

1—станнна; *2*—фарфоровые барабаны; *3*—вальцы, обтянутые резиной; *4*—электродвнгатель

При большом масштабе производства применяют шаровую мельницу, состоящую из металлического цилиндра, выложенного (футерованного) керамическими кирпичами [Л. 71]. При мелкосерийном производстве конденсаторной керамики помол производят в фарфоровых барабанах, которые приводятся во вращение при помощи двух параллельных валиков, обтянутых резиной (фиг. 90,*б*). В случае помола в фарфоровых барабанах масса получается более чистой, чем при помоле в большом барабане. Измельчение массы обычно производится мокрым способом; помимо сырьевых материалов и шаров в мельницу заливается вода. По окончании помола, длящегося иногда



Фиг. 91. Мешалка

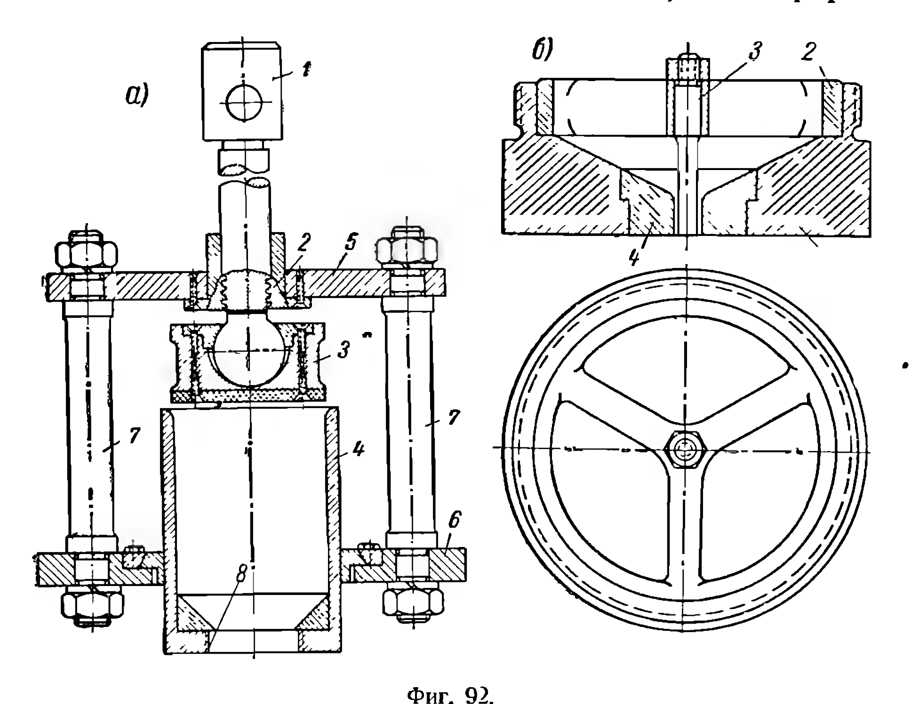
1—двигатель; *2*—редуктор; *3*—вал с пропеллером; *4*—бак; *5*—труба к мембранному насосу

десятки часов, в шаровой мельнице образуется сметанообразная масса, именуемая шликером. Для этого, чтобы судить об окончании помола, из барабана берут пробу шликера, которую пропускают через тонкое сито № 006 (примерно 10^4 *отв/см*^{2}) или № 005 и определяют остаток, не прошедший через отверстия сита; остаток не должен превосходить определенную величину (0,1 ... 0,5% от веса материалов в пробе).

Из шаровой мельницы шликер сливается в специальный бак-мешалку; по пути шликер пропускают через сито № 015 (1600 *отв/см*^{2}), подвергаемое вибрации для того, чтобы вязкая жидкость могла проходить через густые ячейки сита; кроме того шликер подвергается и магнитной очистке. В мешалке (фиг. 91) находится пропеллер, который, вращаясь, поддерживает во взвешенном состоянии частицы массы.

Обезвоживание небольших партий массы производят с помощью батистовых мешков, которые заполняются шликером и подвешиваются; после того как стечет вода, мешки с массой кладут между гипсовыми плитами, отсасывающими влагу из массы. Коржи, вынутые из мешков, досушиваются в сушильных шкафах.

Оформление заготовок конденсаторов, т. е. придание керамической массе необходимой формы, производят различными способами. Плоские заготовки получают путем сухого прессования в стальных прессформах; для этой цели применяют сухую порошкообразную массу, в которую вводят небольшое количество воды (6 ... 10%) или парафина



Фиг. 92.

а — Мундштучный пресс

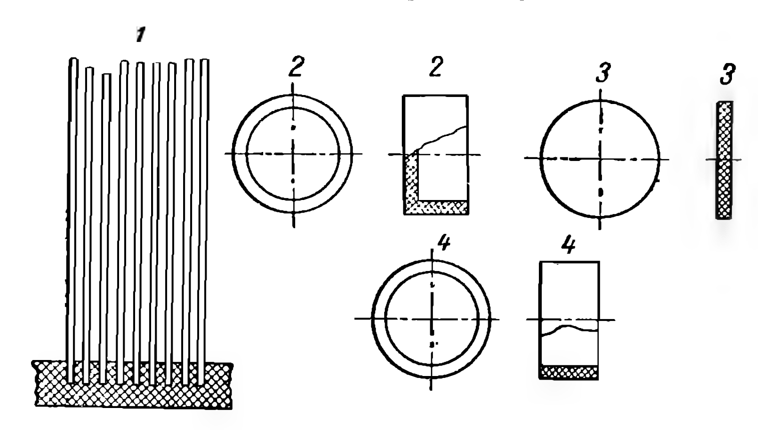
1—винт; *2*—гайка; *3*—поршень; *4*—цилиндр; *5*, *6*—плиты; *7*—колонки; *8*—нарезка для крепления мундштука

б —мундштук

1—корпус; *2*—крестовина; *3*—стержень; *4*—втулка

(6 ... 8%); в качестве связки применяют также и другие материалы. В некоторых случаях для получения более плотного черепка вместо порошка при прессовке применяют так называемую крупку. Из керамического порошка с добавкой около 10% парафина прессуют диски при небольшом удельном давлении (около 250 *кГ/см*); эти диски затем дробятся, и путем рассеивания через сита подбираются фракции нужной крупности. Полученная смесь из зерен—крупка и используется для прессовки заготовок при давлении около 800—1000 *кГ/см*^{2}. Трубчатые заготовки оформляют путем выдавливания через мундштук. Для придания керамической массе пластичных свойств в нее вводят декстрин, тунговое масло и др. После

введения пластификаторов масса сбивается для равномерного распределения связки и для удаления воздушных включений. Выдавливание через мундштук (фиг. 92) производится на мундштучном прессе. Трубку, длиной около 250 *мм*, выходящую из мундштука, подхватывают деревянным лотком и укладывают на текстолитовую плиту. Заготовки для конденсаторов сложной формы (горшковые, цилиндрические) получают путем литья. Для этой цели керамический порошок снова увлажняют, причем при влажности около 30 . . . 35% получается жидкая масса—литейный шликер; для уменьшения вязкости



Фиг. 93. Составные части колонки из капселей

1—крышка с вмазанными для обжига трубками; *2*—капсель; *3*—крышка; *4*—огнеупорное кольцо (обичайка)

вводят некоторые вещества. Шликер наливают в разъемную гипсовую форму, в которой около стенок постепенно образуется уплотненный слой благодаря всасыванию гипсом воды. Остаток шликера выливают, а форму с уплотненным слоем массы выдерживают некоторое время, после чего разбирают гипсовую форму и извлекают заготовку; последнюю подсушивают и затем подвергают механической обработке. В последние годы получило распространение горячее литье из порошка, смешанного с жидким парафином и другими органическими добавками.

Утильный обжиг представляет собой предварительный обжиг, который применяют для трубчатых заготовок и некоторых других типов конденсаторов для того, чтобы придать им механическую прочность и удалить органические вещества, содержащиеся в связке. Обжиг производят, равномерно поднимая температуру до 800 . . . 1000° С.

Основной обжиг характеризуется наибольшей температурой порядка 1300 . . . 1400° С; плоские заготовки укладывают на огнеупорные подставки, которые предварительно

посыпают обожженным кварцевым песком, глиноземом, двуокисью циркония и др.; посыпаемый материал („подсыпка") не должен при высокой температуре обжига реагировать с веществами, содержащимися в керамической массе. Трубчатые заготовки обжигают в подвешенном положении, для чего их предварительно вмазывают (фиг. 93) при помощи огнеупорной массы в сырую крышку капселя, которую сушат при температуре около 80° С; из нескольких огнеупорных колец собирают так называемую колонку; в нее опускают трубчатые заготовки, которые удерживаются в висячем положении, будучи вмазанными в крышку; иногда крышка выполняется с отверстиями, через которые пропускают сырые трубки, закрепляемые затем комочками массы. Обжиг проводят в пламенных печах периодического действия (горнах) или в туннельных печах непрерывного действия. При обжиге материалов на основе TiO_2, начиная с температуры порядка 600° С, необходимо, чтобы газовая среда была нейтральной или окислительной. Это связано с возможностью перехода окислов, входящих в состав минерального сырья, в другую форму, соответствующую иной валентности; при этом некоторые окислы, являвшиеся диэлектриками, превращаются в полупроводники, что влечет появление высоких диэлектрических потерь и объемной электропроводности. Так, при обжиге в восстановительной среде из двуокиси титана TiO_2 могут образоваться TiO, Ti_2O_3; объемная электропроводность от $\gamma = 10^{-13} ом^{-1} см^{-1}$ может возрасти после обжига до $\gamma = 10^{-3} ом^{-1} см^{-1}$. Поэтому для обжига керамики на основе TiO_2 используют окислительную или нейтральную среду.

В процессе обжига по мере повышения температуры вначале происходит испарение влаги, затем удаление конституционной воды, выгорание органических примесей; далее начинаются процессы разложения некоторых окислов, образования новых силикатов, плавление части компонентов с образованием жидкой фазы, пропитывающей весь черепок; появление жидкой фазы влечет частичное растворение огнеупорных окислов и ускорение реакций между окислами. По достижении заданной температуры порядка 1300° С печь начинают охлаждать, причем происходит затвердевание образовавшегося, спекшегося черепка, состоящего из поликристаллической и стекловидной фаз. Конденсаторная керамика содержит, как правило, незначительное количество стекловидной фазы. В процессе обжига (а также сушки) деталей происходит их усадка, сопровождаемая иногда неравномерной деформацией. Величина усадки может достигать 15—25%. Отклонение максимальной температуры от заданной как в нижнюю сторону („недожог"), так и в верхнюю сторону („пережог") недопустимо, керамический черепок оказывается пористым; при пережоге возможно

также расплавление черепка, равно как и появление вздутий и местных газовых включений. Интервал спекания конденсаторной керамики обычно невелик, порядка 40° С.

Рассмотренный в своих главных чертах технологический процесс предусматривает однократный помол массы и однократный высокотемпературный обжиг. По этим причинам он получил название одностадийного процесса.

Обожженные трубки разрезают на отрезки нужной длины с помощью абразивного диска; плоские заготовки в случае необходимости подшлифовывают.

Нанесение электродов производят путем вжигания серебра. Обожженные заготовки для удаления различных загрязнений промывают в горячей мыльной воде, после чего — в проточной воде и затем сушат в нагревательном шкафу. Хорошим способом очистки является прокаливание деталей при температуре около 600° С. Паста для серебрения приготовляется из углекислого серебра Ag_2CO_3 и плавня, в качестве которого используется часто окись висмута Bi_2O_3 и борнокислый свинец PbB_4O_4; эти вещества тщательно растирают с раствором канифоли в скипидаре, который служит связкой; в результате получают густую жидкую пасту, которую можно наносить кистью или фетровым ершом на поверхность керамики. Покрытые серебряной пастой керамические заготовки помещают для подсушивания слоя пасты в сушильный шкаф. Следующей операцией является вжигание серебра, осуществляемое примерно при 800° С. При этом происходит процесс восстановления окиси серебра и прочного скрепления слоя серебра с керамикой. Нагревание посеребренных заготовок можно производить в электрических печах муфельного типа, снабженных отверстиями в передней и верхней стенках для циркуляции воздуха и выхода газообразных продуктов (углекислый газ). При массовом производстве применяют туннельные печи. Процесс нанесения пасты и вжигания повторяют два-три раза для получения равномерного слоя без просветов толщиной около 10 *мкн.*

Припаивание контактных выводов из луженой медной проволоки производят при помощи оловяно-свинцового припоя (40% олова, 60% свинца) или припоя, содержащего помимо указанных металлов небольшое количество кадмия (5%) и серебра (~2%). При температуре плавления припоя(235—245°) тонкий слой серебра может раствориться в олове. Во избежание этого добиваются, чтобы толщина серебряного слоя составляла не менее 10 *мкн*, а пайку производят быстро (3—5 сек.) паяльником небольшой мощности. В качестве флюса при пайке используют раствор канифоли в спирту.

Покрытие эмалью (обычно горячей сушки) производят с целью сделать поверхность плохо смачиваемой, а также с целью защиты от загрязнений и механических повреждений электрода.

Герметизацию керамических конденсаторов производят в тех случаях, когда необходимо устранить влияние влажной атмосферы—при ее длительном воздействии—и влияние пониженного давления воздуха. Вакуумплотную герметизацию при температурах до 80° С обеспечивают, помещая керамический конденсатор (один или несколько) в глазурованную керамическую трубку с посеребренными концами, на которые надевают металлические колпачки, впоследствии припаиваемые к корпусу. Отверстия в колпачках, служащие для пропускания выводов, также запаивают. Разрабатываются и другие способы герметизации керамических конденсаторов.

§ 36. Основные особенности процесса изготовления сегнетокерамики

Изготовление сегнетокерамических конденсаторов наталкивается на ряд трудностей, обусловленных узким интервалом спекания черепка, непластичностью масс и др. В настоящее время задачи освоения технологии мелкосерийного изготовления сегнетоконденсаторов ряда типов могут считаться в основном разрешенными. Большое значение имели работы, проведенные в этой области Н. П. Богородицким, В. И. Жуковским, Я. М. Ксендзовым, М. И. Нейманом и их сотрудниками.

В начальный период развития сегнетокерамики делались попытки перенести без изменений установившийся процесс производства керамических конденсаторов низкого напряжения в область изготовления конденсаторов из титаната бария. Были изготовлены диски диаметром 10 . . . 15 *мм*, толщиной 1,2 . . . 1,4 *мм* и трубки диаметром около 4 *мм* при толщине стенки около 0,4 *мм*.

Выпуск первых конденсаторов из титаната бария был сопряжен с серьезными трудностями, которые, главным образом, заключались в следующем. Керамические материалы типа титаната бария при одностадийном процессе без введения добавок имеют узкий интервал спекания (около 5° С); при отклонении максимальной температуры в нижнюю сторону появляется пористость, снижается диэлектрическая проницаемость и нелинейность сегнетокерамики. Если температура превосходит требуемую (хотя бы на 10° С), начинается расплавление материала. Титанат бария вступает в реакцию с обычно применяемыми материалами для подсыпки—капсельным шамотом, кварцевым песком и отчасти с глиноземом, причем образуются соединения с низкой температурой плавления. Сегнетокерамика принадлежит к непластичным видам керамики; практикуемое иногда для повышения пластичности введение глины и бетонита в данном случае неприемлемо из-за резкого снижения диэлектрической проницаемости и нелинейности. В процессе обжига происходит большая неравномерная

усадка (до 35%); нередко имеет место появление трещин; тонкостенные изделия деформируются и приобретают неправильные очертания. Все виды сегнетокерамики чувствительны к примесям, которые могут находиться в сырье или появиться в условиях производства в одном помещении нескольких видов керамики (радиофарфор, тидол, тиконд и др.). Весьма велико влияние состава газовой среды; наличие в среде CO и CO_2 ускоряет процесс спекания черепка, однако может вызвать частичное восстановление двуокиси титана.

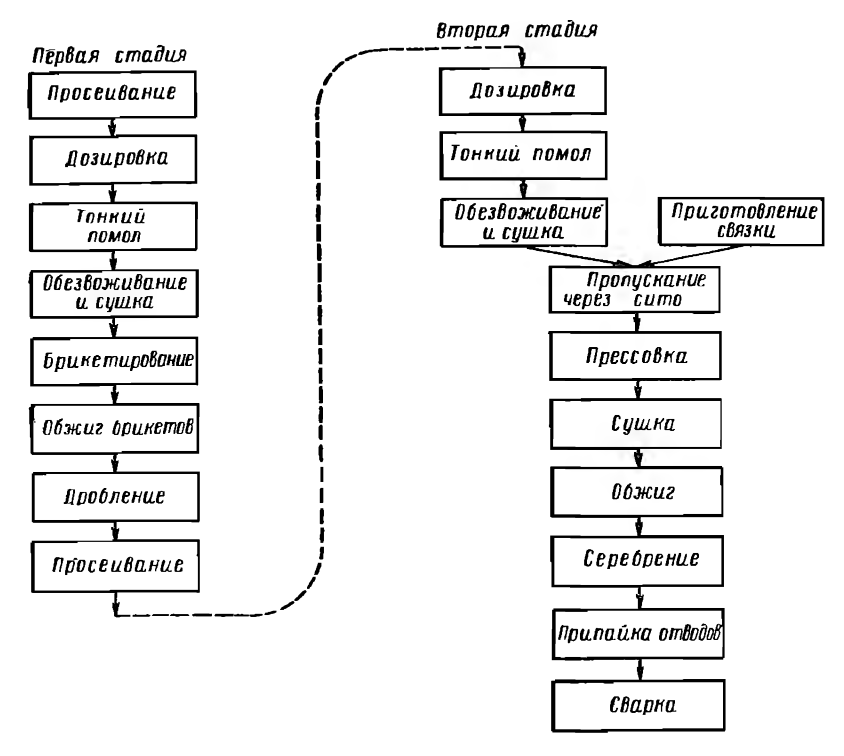
Исследование процессов технологии изготовления сегнетокерамики вначале имело целью, сохраняя в основном существующую последовательность операций, изменить состав керамики и путем введения стеклообразующих примесей (B_2O_3, CaO, MgO и др.) добиться уплотнения черепка при несколько сниженной температуре. Для уменьшения деформации и усадки вводился череп (бой обожженной сегнетокерамики того же состава).

Испытания ряда массы с большим содержанием черепа показали целесообразность использования предварительно обожженных при высокой температуре поликристаллических сегнетоэлектриков в качестве основных компонентов. В соответствии с этим производственный цикл сегнетокерамики разбивается на две стадии.

Первая стадия охватывает измельчение и смешивание исходных сырьевых материалов и синтезирование в процессе первого высокотемпературного обжига поликристаллов с сегнетоэлектрическими свойствами. В результате получаются спекшиеся заготовки—брикеты, состоящие из поликристаллов, которые после дробления являются исходным материалом, используемым на второй стадии цикла.

Вторая стадия охватывает процессы помола поликристаллов, полученных на первой стадии, причем вводятся незначительные добавки—минерализаторы и стеклообразующие окислы, способствующие более раннему спеканию черепка; из полученной массы получают заготовки конденсаторов, которые после сушки подвергают второму высокотемпературному обжигу; обожженные заготовки затем обрабатываются согласно общим методам технологии (серебрение, припайка отводов и т. п.). Опыт применения на протяжении последних лет двухстадийного цикла изготовления сегнетокерамики с введением присадок при втором помоле показывает следующее. Усадка деталей имеет небольшую величину, порядка 10 ... 15% вместо 35%; устраняются коробление и другие крупные деформации, уменьшаются отклонения размеров и формы изделия от заданных. Интервал спекания имеет технически приемлемое значение около 30°C (вместо 5°C). Электрические характеристики керамики воспроизводятся с большей точностью, тогда как прежде имели место сильные

колебания в диэлектрических свойствах различных партий керамики одного и того же состава. Второй обжиг требует значительно меньше времени, чем обычно, благодаря использованию поликристаллов, спекшихся при обжиге на первой стадии. Процесс изготовления сегнетокерамики, несмотря на различие в составах современных типов керамики, имеет ряд



Фиг. 94. Схема изготовления керамических сегнетоконденсаторов (оформление прессовкой)

сходных между собой технологических этапов; последовательность этапов иллюстрируется краткой схемой (фиг. 94), составленной применительно к изготовлению плоских прессованных конденсаторов. При этом имеются в виду только некоторые системы в основном на основе $BaTiO_3$ и не затрагиваются процессы изготовления сегнетокерамики на основе соединений свинца, отличающиеся специфическими особенностями.

Ввиду чувствительности свойств керамики к изменениям состава используют материалы с минимальным количеством примесей; так, применяемая двуокись титана марки „конденсаторная" не должна содержать примесей свыше 2%. Обожженная на 1320° С двуокись титана подвергается сухому помолу

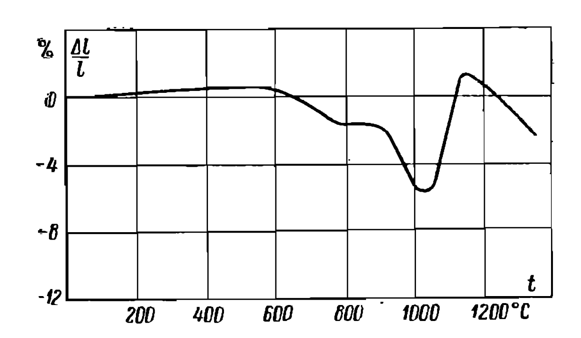
до прохождения без остатка через сито № 02 (~900 *отв/см*^{2}). Другие материалы сушатся при температуре 80° С и также просеиваются через это сито.

Тонкий первичный помол сырья, имеющий целью измельчение и тщательное перемешивание компонентов, осуществляют мокрым способом: остаток на сите № 006 не должен быть более 0,1%. При расчете шихты учитывают количество примесей и влажность материала. Для некоторых видов керамики необходимо помол материалов для каждой системы, входящей в состав керамики, производить раздельно. Последующая обработка (обезвоживание, прессовка брикетов и их обжиг) в этом случае также производится раздельно для каждой системы. Для помола используют фарфоровые барабаны, в которые загружаются вода, галька и сырье; соотношение между ними каждый раз устанавливается применительно к материалу; так для помола смеси TiO_2—$CaCO_3$ берется соотношение 1,5 : 1,1. Желательно использование вместо гальки—шаров, изготовленных из керамики того же состава, что и приготовляемая масса. Жидкую массу из барабана через сито и магнитный сепаратор сливают в батистовые мешки. В некоторых случаях во избежание удаления растворенных примесей жидкую массу сливают в бачки и сушат при температуре 90° С; коржи досушивают в нагревательных шкафах при температуре около 100° С. Для получения однородности массу после сушки пропускают дважды через сито № 06. Брикетирование порошка для обжига имеет целью лучшее использование объема печи и ускорение твердофазовых реакций. Брикеты в виде дисков или плиток толщиной 5—10 *мм* прессуют из порошка с влажностью 6—8% при давлении 300 *кГ/см*^{2}.

При обжиге брикетов происходят процессы разложения карбонатов (например $BaCO_3$) и реакции образования поликристаллов—$BaTiO_3$, $SrTiO_3$, $BaSnO_3$ и др. Термическое исследование образования титаната бария из углекислого бария и двуокиси титана показало, что примерно при 830 и 970° С происходят полиморфные превращения углекислого бария [Л. 72]; диссоциация углекислого бария в присутствии двуокиси титана происходит при 1100° С, после чего возникает значительный экзотермический эффект. Как видно из кривой изменения длины образца, процесс образования $BaTiO_3$ сопровождается увеличением объема (фиг. 95), и поэтому при однократном обжиге (в одну стадию) изделия обладают значительной пористостью и характеризуются неоднородной деформацией. Температура (конечная) обжига брикетов, как показал ряд исследований, должна быть не намного (примерно на 50—100° С) ниже конечной температуры обжига сегнетокерамики на второй стадии; благодаря этому удается свести усадку и деформацию изделий при их обжиге

на II стадии к незначительной величине. Так, например, брикеты из титаната бария, из массы, высушенной в бачках, обжигают при 1280°.

Потемнение черепка брикетов, появляющееся иногда под воздействием восстановительной среды, можно устранить последующим прокаливанием брикетов в электрической печи при температуре 900—1000° С. Вообще же, газовая среда при обжиге, начиная с температуры ~600° С, должна быть окислительной для предупреждения возможности восстановления



Фиг. 95. Изменение длины образца из смеси $BaCO_3$ — TiO_2 (1 : 1) при изменении температуры

двуокиси титана. Обожженные брикеты очищают от зерен подсыпки, в качестве которой используют вещества, не реагирующие активно с компонентами массы; например, для системы $BaTiO_3$—$BaSnO_3$ используют обожженную на 1500° С крупнозернистую двуокись циркония.

Вторая стадия процесса изготовления начинается с дробления брикетов, которые измельчают до прохождения через сито № 06 и затем загружают для вторичного помола совместно с технологическими добавками; для этой цели используют некоторые минерализаторы и стеклообразующие окислы, например глинозем. Введение добавок при двухстадийном процессе позволяет несколько расширить интервал спекания черепка. Тонкий помол производят обычно до получения остатка 0,1 . . . 0,5% на сите № 006. Для получения весьма мелких частиц керамики (~ 5 *мкн*) применяют вибрационный помол.

Обезвоживание массы выполняют либо в мешках с последующим удалением влаги при помощи гипсовых плит, либо путем сушки массы в алюминиевых бачках или противнях при температуре 90° С; последний способ применяют при наличии растворимых веществ, которые желательно сохранить в массе в качестве стеклообразующих компонентов. Следует

указать, что сегнетокерамика весьма чувствительна к примесям; поэтому барабаны, сита, бачки и другое оборудование, используемое при изготовлении массы, должны перед употреблением тщательно вымываться. Желательно применение отдельного комплекта для каждого вида сегнетокерамики.

Подготовка массы для оформления изделий производится по-разному в зависимости от способов оформления, рассмотренных ниже.

Обжиг изделий ведут в нейтральной или слабоокислительной среде по режиму, обеспечивающему получение хорошо спекшегося черепка. Максимальная температура при обжиге составляет от 1300 до 1500° С; она зависит от состава керамики, наличия тех или иных примесей в исходном сырье, от состава и количества минерализаторов и стеклообразующих добавок, от состава газовой среды и от длительности обжига.

Обжиг изделий возможен в определенных зонах периодической или туннельной печи. Могут быть использованы и лабораторные электрические печи, однако для большинства из них верхний предел температур ограничен значением 1300°С, температура поднимается медленно, газовая среда в основном является восстановительной.

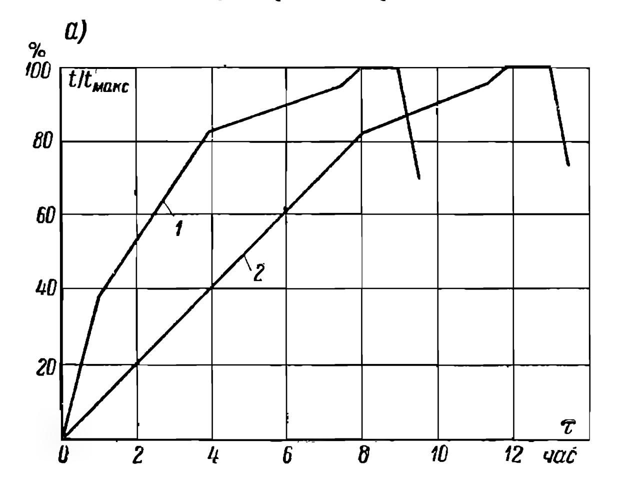
В ряде конструкций эти недостатки в значительной мере устранены; для обжига небольших партий сегнетокерамики может быть использована печь с нагревательными стержнями, установленными вертикально по окружности [Л. 73].

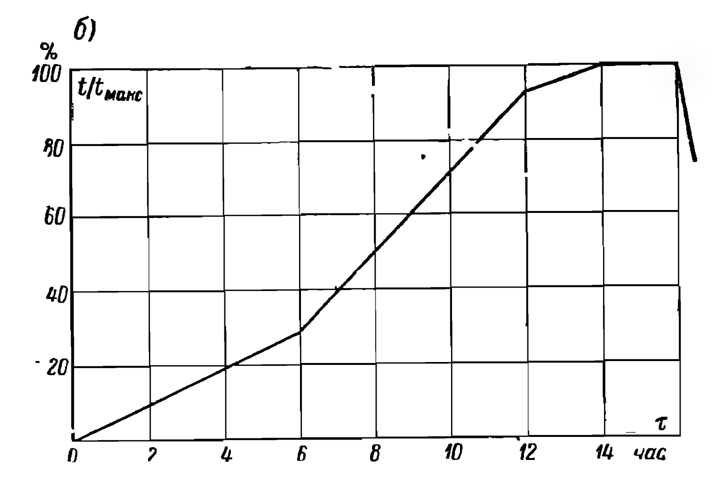
37. Изготовление тонкослойных плоских конденсаторов

Получение сегнетоконденсаторов с высокой удельной емкостью связано со снижением толщины керамического диэлектрика. Использование небольших толщин керамики одновременно позволяет при тех же рабочих напряжениях повысить напряженность поля и тем самым получить достаточное насыщение, необходимое для нелинейного конденсатора, при более низком напряжении. Наконец, будет выше и нелинейность сегнетоконденсатора, обратно пропорциональная толщине диэлектрика (глава четвертая). Все эти соображения настоятельно требуют изыскания способов получения тонкослойной сегнетокерамики. Небольшая толщина диэлектрика порядка 0,25 *мм* может быть получена в трубчатых керамических конденсаторах. Однако возможности образования из трубок блоков большой емкости ограничены (глава четвертая), тогда как использование плоских элементов дает значительный эффект.

Прессовку плоских относительно толстых заготовок конденсаторов (толщиной 0,5 *мм* и более при диаметре 15 ... 30 *мм*) производят чаще не из порошка, а из крупки. Для приготовления крупки в порошок вводят небольшое количество — 6 ... 8% водной связки (например пятипроцентного раствора поливини-

лового спирта), смесь дважды протирают через сито № 06 и прессуют при давлении около 150 $кГ/см^3$ небольшие брикеты. Последние измельчают, протирают через сито № 06 и помещают





Фиг. 96. Примерные графики обжига прессованных сегнетокерамических пластинок из твердых растворов на основе титаната бария: *а* — на водной связке; *б* — на парафиновой связке

1—весьма тонкие диски (толщина 0,2 . . . 0,3 *мм*); *2*—то же, большей толщины;

в герметически закрытый сосуд во избежание испарения влаги. Из этой крупки путем двустороннего прессования оформляют заготовки конденсаторов (давление 600 ... 800 $кГ/см^2$). После воздушной сушки, а затем досушивания в нагревательном шкафу ($t = 80^0$ С) заготовки зачищают и ставят на обожженные

шлифованные подставки. Примерный график обжига в электрической печи показан на фиг. 96; после окончания обжига необходимо быстрое охлаждение до 600° С. Помимо водных связок используют и безводные связки, в основном парафин; оформление заготовок в этом случае почти не отличается от общей методики (см. параграф 35). График обжига характеризуется более плавным подъемом температуры (фиг. 96). Заметим, что обжиг малогабаритных конденсаторов в электрической печи может быть проведен по более короткому графику — за 6 . . . 8 час.

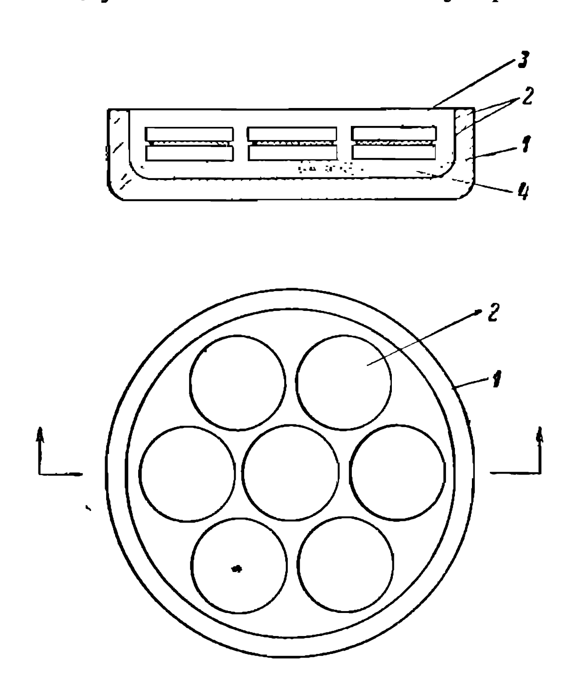
Тонкослойные сегнетоконденсаторы состоят из ряда керамических слоев, разделенных металлическими электродами. Задача получения керамических пластинок толщиной около 0,2 *мм* в настоящее время решается несколькими способами. Получение таких пластинок прессованием не требует специального оборудования и удобно при изготовлении небольших партий.

Порошок, предназначенный для прессовки особо тонких пластинок (обычно дисков), приготовляют со связкой на поливиниловом спирте; возможно использование и некоторых других связок. Порошкообразный поливиниловый спирт растворяется в горячей воде (температура ~ 60° С) в количестве 5 *г* на 100 *см*³ воды; полученную однородную, прозрачную клейкую жидкость вводят в керамический порошок в количестве 8 . . . 12%, причем смесь вначале пропускают через сито № 06, а затем через сито № 0355. Была проверена возможность введения раствора поливинилового спирта непосредственно в барабан при помоле массы; при этом, однако, приходится для обезвоживания массы сливать ее в бачок и выпаривать в нагревательном шкафу для сохранения в составе поливинилового спирта. Связка должна быть хорошо распределена между частицами порошка.

Загрузку порошка в прессформу производят равномерно, разравнивая порошок по поверхности нижнего пуансона, погруженного в прессформу так, чтобы его торец находился бы несколько ниже верхней плоскости прессформы; величина заглубления подбирается опытным путем в зависимости от требуемой толщины диска. Порошок засыпается через сито № 045 при легком постукивании о рамку. Излишек порошка сдвигают тонкой линейкой (0,3 *мм*), которую ставят на ребро и перемещают по плоскости прессформы от середины к одному краю, потом к другому. На слой порошка опускают пуансон. С помощью дополнительных пуансонов в одной прессформе одновременно можно отпрессовать 3 — 5 заготовок. Прессование производят на гидравлическом прессе при давлении около 1200 *кГ/см*². Для того чтобы извлечь отпрессованную заготовку, плавно выталкивают пуансон и, когда керамический диск окажется на уровне верхней плоскости прессформы, его осторожно сдвигают по отшлифованной поверхности прессформы на пла-

стинку стекла; здесь диск подсушивается и при этом упрочняется.

Обжиг тонких прессованных дисков имеет ряд особенностей. Тонкие диски во избежание коробления ставятся на шлифованные огнеупорные подставки; сверху каждый диск накрывается огнеупорной шлифованной накладкой (фиг. 97). Подставку и накладку изготавливают из огнеупорного материала,



Фиг. 97. Разрез капселя с установленными для обжига дисками

1—капсель; 2—накладка и подставка; 3—диск из сегнетокерамики; 4—подсыпка

применяемого для подсыпки. Толщина накладки (порядка 3—5 *мм*) подбирается экспериментально. Подставка и накладка предварительно обжигаются и затем шлифуются для получения плоского основания. При обжиге дисков из $BaTiO_3$ — $BaSnO_3$ и из некоторых других видов керамики могут быть использованы подкладки и накладки, изготовленные из двуокиси циркония с добавкой 5% окиси кальция. После обжига на 1450° С они шлифуются.

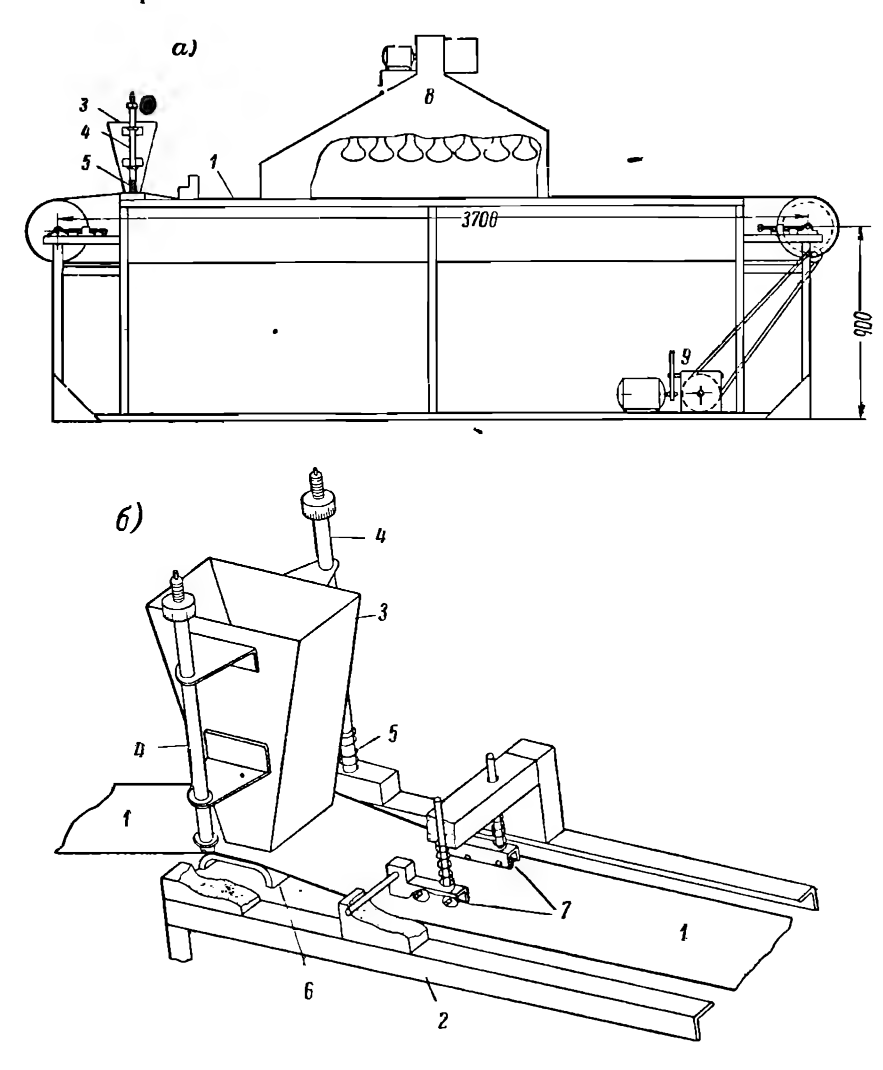
Применение описанных процессов позволяет изготовлять тонкие керамические диски с незначительной деформацией, не требующие шлифовки; их толщина может иметь величину 0,2 *мм* при диаметре 25 *мм* и 0,3 *мм* — при диаметре 40—50 *мм*. Усадка при обжиге дисков обычно невелика (~13%). Для

обжига тонкослойной сегнетокерамики возможно применение сокращенного графика (фиг. 96); максимальная температура несколько ниже (на 10 ... 20° С), чем при обжиге пластин большей толщины.

Изготовление тонкослойной керамики из шликера согласно опубликованным в литературе данным основано на применении органических связок, вводимых в безводный шликер, из которого затем изготовляют путем вытяжки тонкие пластинки [Л. 74]. Шликер содержит керамический порошок — около 75% по весу и толуол, в котором растворены в небольшом количестве смолы, этилцеллюлоза и другие органические вещества. Для получения однородной массы шликер перемешивают в фарфоровом барабане в течение 24 часов; после этого шликер пропускают через сито 325 меш (примерно № 0045) и подвергают вакуумированию при медленном перемешивании в течение 30 минут, чтобы избежать расслаивания шликера. Плотность шликера составляет 2,8 *г/см*³. После снятия вакуума вводят воздух, насыщенный парами толуола для того, чтобы устранить испарение толуола и образование пленки на поверхности шликера. Как видно из сказанного, изготовление и использование в производстве безводного шликера на основе толуола отличается сложностью; поэтому предпочтительным является использование более простой технологии с применением водных связок, например, на основе поливинилового спирта.

Вытяжку керамических пластинок производят с помощью непрерывной ленты *1* из нержавеющей стали (фиг. 98), приводимой в движение электроприводом *2*. Керамический шликер наливают в бачок *3*, который может перемещаться вертикально на стойках *4*; положение бачка над выступом *6* фиксируется пружинами *5*. Натяжение ленты достигается при помощи роликов *7*. Вытянутая в виде тонкого слоя керамическая масса попадает для сушки в камеру, содержащую лампы инфракрасного света. Чтобы предотвратить прилипание керамики к металлической ленте *1*, с помощью которой осуществляется процесс вытяжки, ленту покрывают пятипроцентным спиртовым раствором этилцеллюлозы или другим лаком. С помощью описанного устройства удавалось вытягивать пластинки керамики толщиной от 0,15 и выше. После сушки эти пластинки имеют достаточную прочность для проведения последующих операций (резка, штамповка, укладка в капсель). Высушенный тонкий лист керамики осторожно снимают с ленты с помощью лопатки, причем предварительно срезают кромки шириной примерно 5 *мм*. Из этих заготовок штамповкой получают пластинки для конденсаторов. В случае использования безводных связок температуру приходится поднимать медленно до выгорания органических примесей (~600° С); после этого температуру быстро повышают до максимальной. Электроды из серебра наносят вжиганием при 600° С. Припайку выводов к посеребренным

пластинкам производят, предварительно нагревая их во избежание растрескивания; при пайке применяют небольшое количество припоя.



Фиг. 98.
а — Общий вид установки для изготовления тонких керамических пластинок из шликера; *б* — схема узла для вытяжки керамических пластинок

1—стальная лента (транспортер); *2*—рама; *3*—бачок для шликера; *4*—стойки; *5*—пружины; *6*—выступ; *7*—натяжные ролики; *8*—камера сушки инфракрасными лучами; *9*—привод

Другой способ получения тонкослойных сегнетоконденсаторов заключается в том, что из безводного керамического шликера отливают или вытягивают тонкие листки. Параллельно из-

готовляются подобные же листки из смеси металлического порошка (никель или его сплавы) с органической связкой. Пакет, в котором керамические листки чередуются с „металлическими“, спрессовывают и обжигают.

Керамический порошок, используемый как для прессовки, так и для приготовления шликера, получают на основе двухстадийного процесса, т. е. путем измельчения обожженной сегнетокерамики.

38. Изготовление трубчатых конденсаторов

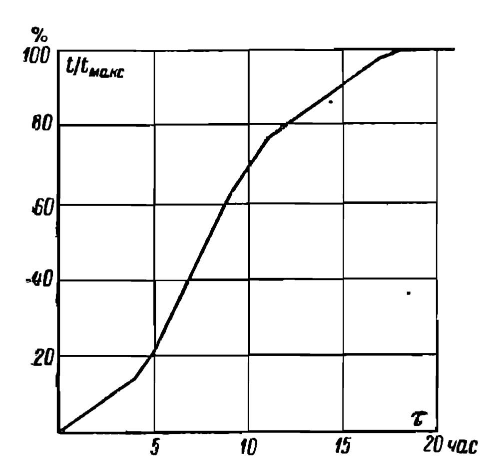
Оформление трубчатых заготовок производят из массы, получаемой из керамического порошка; последний приготовляется путем помола обожженных брикетов с добавками (вторая стадия, фиг. 94). Для придания пластичных свойств в состав порошка с влажностью около 2% обычно вводят порошкообразный декстрин (около 6% по весу) и два-три раза смесь пропускают через сито № 06. Затем добавляют тунговое масло (около 8% по весу) и массу хорошо перемешивают в лопастном смесителе. После этого добавляют воду (около 6%), вручную перемешивают массу и потом пропускают ее через шнековый смеситель (мясорубку) или через сито № 05. Для удаления пузырьков воздуха массу сбивают на полотне или ее пропускают через вакуумmялку; для лучшего распределения связки массу выдерживают в закрытых ларях несколько суток.

В отличие от обычного способа протяжки, трубки из сегнетокерамических масс иногда вытягивают на мундштучном прессе с подвяливанием; для этого выходящую из мундштука трубку пропускают через вертикальную трубчатую электропечь, после чего трубку принимают на лоток и сушат вначале на подставках, а затем в нагревательном шкафу при 100° С. Во избежание деформаций и появления трещин замедляют процесс сушки трубок, накрывая лотки с трубками в первый период сушки сырым полотном. Трубчатые заготовки вначале обжигают на утиль для удаления органических примесей и упрочнения заготовки; утильный обжиг применяют для тонкостенных трубок; трубки с более толстыми стенками не обжигают на утиль, а для защиты поверхности покрывают часть трубки с одной стороны слоем нитролака. После высыхания лака образуется твердая пленка на поверхности и трубка может быть установлена (вмазана) в слой шамотной массы, помещенной на крышке капселя (см. параграф 35). В случае, если трубки недостаточно прочны, их закрепляют для обжига в вертикальном положении иначе. Первоначально изготовляют огнеупорные крышки (в основном из глинозема и огнеупорной глины), которые сушат при 80° С; затем в каждой крышке просверливают ряд отверстий; пропустив в каждое отверстие трубку, закрепляют ее комочком массы. Подвешенные на

крышке трубки опускают в колонку, составленную из огнеупорных колец. Примерный график обжига трубок близок к графику для плоских заготовок (см. фиг. 96, кривая *1*), отличаясь более продолжительной выдержкой при максимальной температуре. Остальные стадии изготовления конденсаторов аналогичны описанным выше.

39. Изготовление боченочных конденсаторов

Оформление заготовок боченочных конденсаторов производят путем прессовки из керамического порошка, получаемого в результате помола брикетов с добавками (вторая стадия). В качестве связки используют парафин, который в предварительно нагретый до 120° С порошок вводится в жидком виде; количество парафина составляет 8 ... 10% от веса порошка. Порошок с парафином в горячем состоянии три раза протирают через сито № 06 для равномерного распределения парафина. Получение требуемого для высоковольтных конденсаторов более плотного и однородного черепка иногда достигается оформлением заготовок методом литья. Отчасти эта задача разрешается применением крупки.



Фиг. 99. Примерный график обжига боченочных сегнетоконденсаторов в печи периодического действия

Порошок с парафиновой связкой (8 ... 10%) предварительно таблетируют при давлении около 250 *кГ/см*². Полученные таблетки дробятся, и крупка просеивается через ряд сит. Более крупные фракции повторно измельчаются, а более мелкие—используются при таблетировании; подбор крупности зерен крупки для прессования производят экспериментально. Из такой крупки прессуют заготовки высоковольтных конденсаторов, причем давление составляет около 900 *кГ/см*². Применяют двойное прессование—по мере повышения давления в матрицу одновременно вдвигаются и нижний и верхний пуансон; порошок уплотняется и сверху и снизу, благодаря чему увеличивается однородность строения тела заготовки. В зависимости от состава керамики усадка (по высоте) составляет 18 ... 22%.

Обжиг может быть проведен по режиму, применяемому для печей периодического действия; примерные графики обжига

боченочных высоковольтных сегнетоконденсаторов представлены на фиг. 99. В качестве материала для подсыпки при установке заготовок высоковольтных конденсаторов в капсель используют не только двуокись циркония, но и другие огнеупорные окислы. Так, для системы $BaTiO_3$—$CaTiO_3$—$SrTiO_3$ применяют глинозем, насыпаемый в капсель слоем не менее 10 *мм* толщины. Существенное значение имеет контроль черепка после обжига. Из разных мест капсельной колонки отбирают 5 конденсаторов и после нанесения электродов измеряют емкость и $\mathrm{tg}\,\delta_э$ в слабом поле как в нормальных условиях, так и после воздействия влаги при частоте $f=(0{,}5\ \ldots\ 1{,}5)\,10^6$ *гц*. Емкость и добротность конденсатора должны быть не ниже номинальных, отклонение в большую сторону не ограничивается. Если отобранные образцы удовлетворяют требованиям, то вся партия, вышедшая из обжига, считается годной.

Сегнетокерамические конденсаторы боченочного типа для повышения напряжения частичных разрядов иногда погружают в масло или снабжают защитным покрытием; одним из путей повышения рабочего напряжения является опрессовка в пластмассу.

В заключение отметим, что, как видно из сказанного выше, технологические методы производства сегнетокерамики не отличаются особой сложностью и допускают механизацию в такой же мере, как и процессы производства конденсаторов из тиконда и других видов линейной конденсаторной керамики. Несмотря на ряд трудностей, еще не преодоленных, в особенности для отдельных видов сегнетокерамики, есть основания считать, что изготовление сегнетоконденсаторов имеет под собой достаточно прочную технологическую методику, проверенную в условиях серийного опытного производства в течение ряда лет.

Глава шестая

ТИПОВЫЕ СЕГНЕТОКОНДЕНСАТОРЫ С МАЛОЙ И БОЛЬШОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

В главе четвертой были рассмотрены общие вопросы конструкции сегнетокерамических конденсаторов низкого напряжения; обсуждалось несколько конструктивных вариантов конденсаторов, появившихся в связи со специальными задачами использования сегнетокерамики.

В данной главе приводятся сведения о некоторых типовых сегнетоконденсаторах, обладающих малой нелинейностью и применяемых вместо линейных конденсаторов в связи с их высокой удельной емкостью. Далее рассматриваются некоторые типовые нелинейные конденсаторы.

Керамический сегнетоэлектрик в низковольтных конденсаторах с малой нелинейностью обычно находится в слабом поле, содержащем небольшую переменную составляющую высокой частоты. В силу этих условий для указанных конденсаторов представляют интерес следующие электрические характеристики: номинальное и испытательное напряжения; номинальная эффективная емкость в слабом переменном поле, удельная эффективная емкость, колебания емкости в рабочем диапазоне температур; добротность или тангенс угла диэлектрических потерь в слабом поле, его изменения под воздействием изменений температуры и влажности;. сопротивление изоляции. Конденсаторы с малой нелинейностью низкого напряжения применяются в цепях блокировок низкой частоты и в цепях фильтров, в качестве разделительных и т. п. Конденсаторы высокого напряжения (боченочные) используются в основном в качестве фильтровых в широковещательной аппаратуре.

В конденсаторах с большой нелинейностью керамический диэлектрик находится в относительно сильном поле. В зависимости от условий применения это поле может содержать или не содержать постоянную составляющую. Для указанных конденсаторов представляют интерес характеристики, позволяющие судить о степени эффективной и реверсивной нелинейности, о содержании высших гармоник в кривой тока и т. п. Нелинейные конденсаторы начинают применять в качестве не-

линейных элементов в усилителях, умножителях частоты и в некоторых радиотехнических схемах. Ряд разработок в области типовых сегнетоконденсаторов был проведен Н. П. Богородицким, Т. Н. Вербицкой, В. И. Жуковским, Я. М. Ксендзовым, М. И. Нейманом, И. Д. Фридбергом и их сотрудниками.

40. Материалы для конденсаторов с малой нелинейностью

Одно из замечательных свойств сегнетокерамики—сверхвысокая диэлектрическая проницаемость—выдвигает этот вид диэлектрика для использования в конденсаторах, обладающих высокой удельной емкостью [Л. 76]. Для изготовления таких конденсаторов в настоящее время применяется ряд керамических материалов, представляющих собою твердые растворы, главным образом на основе титаната бария. Материалы технического значения пока охватывают три группы: СК1 с максимумом эффективной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_э$ в области отрицательных температур, СК2—с максимумом $\varepsilon_э$ вблизи нормальной температуры и СК3—с максимумом $\varepsilon_э$ при температуре свыше 100° С (табл. 6). Сегнетокерамика типа СК1 при-

Таблица 6

Основные свойства сегнетокерамики СК1, СК2 и СК3

Наименование величин	Единица измерения	Значения величин		
		СК1	СК2	СК3
Эффективная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_э$ при 20° С при частоте $f = 10^3$ *гц* и градиенте поля $E = 50$ *в/см*	—	от 1000 до 1700	от 3000 до 6000	от 1400 до 1750
Температура максимума $\varepsilon_э$ . . .	°С	-90 ± 20	$+30 \pm 25$	$>+100$
Эффективная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_э$ при —60° и при +80° С в процентах от значения $\varepsilon_э$ при 20° С не менее	%	80	20	40
Удельное объемное сопротивление ρ_V при 100 С не менее	*ом·см*	10^{11}	10^{10}	10^{10}
Тангенс эффективного угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\,\delta_э$ при 20° С в слабых полях, при частоте $f = 10^3$ *гц* не более	—	0,0015	0,03	0,03
То же после увлажнения не более	—	0,0030	0,06	0,06
Пробивной градиент $E_{пр}$ при постоянном токе при толщине плоских образцов 2 *мм* под маслом не менее	*кв/см*	60	30	20
Динамический пьезомодуль d_{31} не менее	*к/н*	—	—	$0{,}5 \cdot 10^{-10}$
Прочность на изгиб $\sigma_{из}$ не менее	*кг/см²*	700	500	500
Плотность γ	*г/см³*	7	6,5	6,5

надлежит к материалам на основе титаната стронция; в связи с этим температурная зависимость диэлектрической проницаемости имеет максимум при низких температурах—около —90° С. Керамика СК1 имеет пониженные диэлектрические потери; тангенс угла потерь при частоте 10^3 *гц* примерно в 20 раз меньше $\operatorname{tg}\delta$ для керамики СК2 и СК3. В диапазоне рабочих температур от —60 до +80 С диэлектрическая проницаемость составляет не менее 80% от значения при 20° С. Сегнетокерамика типа СК2 должна обладать высокой диэлектрической проницаемостью и к этому типу относят ряд материалов. Для производства относительно крупных деталей (например боченочных конденсаторов) применяют один из твердых растворов $CaTiO_3$—$SrTiO_3$—$BaTiO_3$ с небольшими добавками (3,13)—керамику, обладающую расширенным интервалом спекания, но острым максимумом в температурной зависимости диэлектрической проницаемости. Необходимость раздельного синтезирования трех соединений—$CaTiO_3$, $SrTiO_3$ и $BaTiO_3$ осложняет производство. При температуре 20° С диэлектрическая проницаемость достигает 6000.

Более простой технологией и бо́льшим постоянством диэлектрической проницаемости при изменении температуры обладает материал этой же группы, разработанный под руководством Я. М. Ксендзова,—керамика СМ-1.

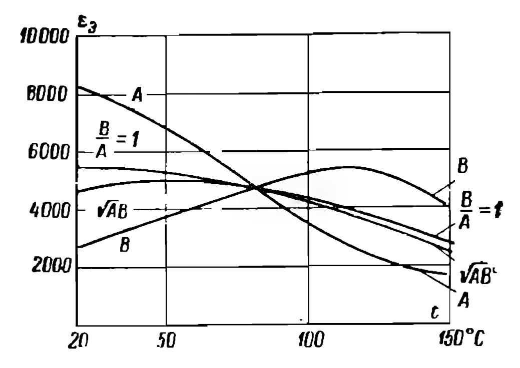
Основой служит спек титаната бария, содержащий несколько процентов свободной окиси бария, к которому на второй стадии технологии при помоле добавляют небольшие количества двуокиси циркония, магнезита и др.

Технология как и в других случаях—двухстадийная. Путем вибрационного помола достигается получение весьма мелкого зерна—от 5 *мкн* и выше. Оформление заготовок плоских и трубчатых конденсаторов производят обычными для безглинистых масс методами. Обжиг заготовок ведут в туннельной или камерной печи, причем температура максимума равна 1340° С; интервал спекшегося состояния составляет значительную для сегнетокерамики величину: ± 20° С. Наряду с положительными технологическими особенностями керамика СМ-1 имеет довольно высокую диэлектрическую проницаемость—порядка 3000 при нормальной температуре в слабом поле.

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости в слабых полях характеризуется нерезко выраженным максимумом примерно при 30° С, что видно из следующих средних данных, полученных на производственной партии. При —60° С значение $\varepsilon_э=1400$; при 20 С $\varepsilon_э=2800$; при 30 С $\varepsilon_э=2880$; при 40—50° С $\varepsilon_э=2700$; при +80° С $\varepsilon_э=2190$. В интервале температур от 15 до 80 С колебания диэлектрической проницаемости не превосходят 30% от значения при 20° С. В нормальных условиях при частоте $f=10^3$ *гц* и напряженности поля $E \leqslant 50$ *в/см* по данным измерений $\operatorname{tg}\delta=0{,}012$ .. 0,034. После 24-часового

пребывания в воде и последующего обсушивания $\text{tg}\,\delta = 0{,}013 \ldots 0{,}05$. Техническими условиями допускаются значения $\text{tg}\,\delta = 0{,}04$ до и $\text{tg}\,\delta = 0{,}07$ после действия влаги.

Удельное объемное сопротивление сегнетокерамики СМ-1 при 20° С $\rho_V \geqslant 10^{12}$ *ом·см*. Пробивная напряженность при постоянном токе на плоских образцах толщиной ~2,5 *мм* составляет от 50 до 66 *кв/см*. Технические условия допускают значение пробивной напряженности 40 *кв/см*. Керамика СМ-1 механически достаточно устойчива: прочность на изгиб $\sigma_и \geqslant 600$ *кГ/см²*.



Фиг. 100. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости керамики (Ва Pb) (Ti Sn) O_3

Основная область использования сегнетокерамики СМ-1 — миниатюрные сегнетоконденсаторы.

Керамика СКЗ состоит в основном из твердого раствора титаната свинца в титанате бария; согласно изложенному ранее этот вид керамики имеет максимум диэлектрической проницаемости при повышенных температурах (см. параграф 21). При нормальной температуре величина $\varepsilon_э$ около 1500. Основная область применения этой керамики—пьезоэлектрические преобразователи, однако, ввиду простоты технологии, керамика этого типа используется иногда и для сегнетоконденсаторов небольшой емкости. Динамический пьезомодуль керамики СКЗ имеет величину свыше $0{,}5 \cdot 10^{-10}$ *к/н*. Заметим, что, помимо рассмотренных, в технике используются и другие разновидности сегнетокерамики.

Сочетание двух материалов с далеко отстоящими точками Кюри позволяет получить, например, материал с формулой (BaPb) (TiSn) O_3, обладающий высокой диэлектрической проницаемостью до 5000 (фиг. 100), мало зависящей от температуры. Обозначения на кривых отвечают составам (в мол. процентах).

Катион	*A*	*B*
Ba	75	55
Pb	25	45
Ti	75	70
Sn	25	30

Среди других материалов для сегнетоконденсаторов следует отметить поликристаллический титанат бария с очень мелкими зернами, который имеет при комнатной температуре диэлек-

трическую проницаемость около 3000 (вместо 1300); проницаемость остается почти стабильной при температурах от 20 до 90° С; для этого материала характерна слабая зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности постоянного поля.

Исследования этого вида титаната бария показали, что по сравнению с $BaTiO_3$ заметного смещения вдоль оси температур точки Кюри не наблюдается, но в точке Кюри $\varepsilon=9000$; электрострикция и гистерезис слабо выражены. Необходимо в связи с этим указать на позднее полученные данные об уменьшении тетрагональности и поляризации, наблюдавшемся в частицах титаната бария размером 0,4 *мкн*. Средняя величина зерна в этом материале составляет около одного микрона. При изготовлении мелкозернистой титанобариевой керамики пользуются очень тонким порошком, который обрабатывается так, что поверхность каждого отдельного зерна покрывается слоем, препятствующим диффузии. Во время последующего обжига — если температура не превышает допустимую — этот слой задерживает рост крупных кристаллов, позволяя вместе с тем получить плотное строение черепка. Керамика этого типа выпускается под названием сибатит; эффект повышения диэлектрической проницаемости, повидимому, связан с уменьшением стрикционных напряжений в мелких зернах. Исследование изменений диэлектрической проницаемости со временем показали, что в мелкозернистом титанате бария изменения диэлектрической проницаемости составили за 20 ... 25 дней около 3%,

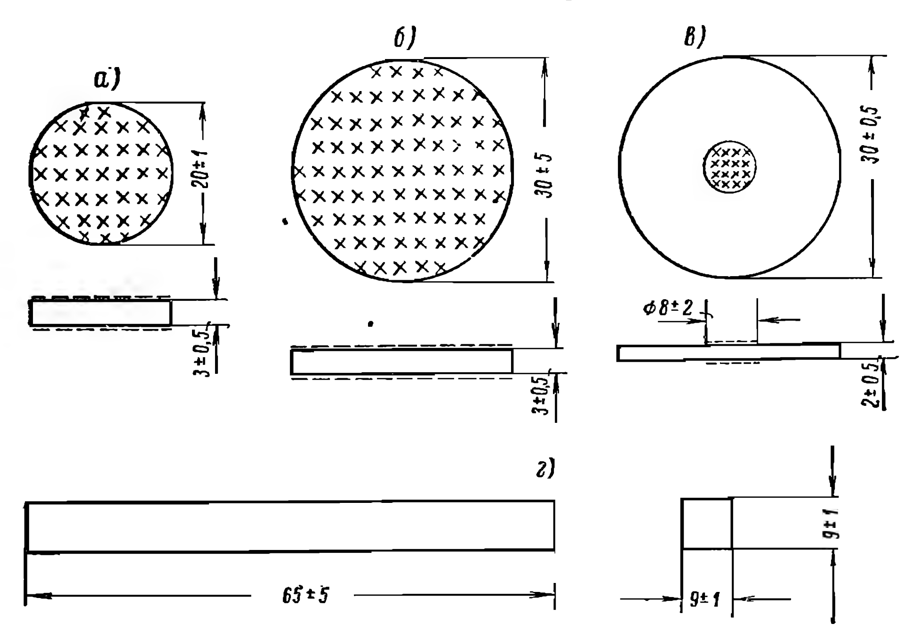
Таблица 7

Значения $\varepsilon_э$ и $tg\,\delta_э$ для некоторых сегнетокерамических материалов, используемых в миниатюрных конденсаторах

Наименование	$\varepsilon_э$	$tg\,\delta \cdot 10^4$ при $f = 10^6$ *гц*	Примечание
Хай-Кэпс	5000	—	
Хай-Кэпс	500	—	$\alpha_\varepsilon = -3000 \cdot 10^{-6}$ град [1]
Эпсилан 900	900	25	$\alpha_\varepsilon = -2300 \cdot 10^{-6}$
Эпсилан 7000	7000	125	$\alpha_\varepsilon = -20\,000 \cdot 10^{-6}$
К-500	350—400	30	
К-2000	1500—1800	80	$\alpha_\varepsilon > 0$
К-3500	3500	100	$\alpha_\varepsilon > 0$
ДК-3500	3500	100	
Розальт 160	130—160	100	
Розальт 2000	2000	200	
Розальт 4000	4000	200	
Кераконд	200	20	
Супраконд	1800	150	
Ультраконд	4000	150	
Фаралит J	1500	150	
Фаралит U	3600	250	
Сибалит 3000	2000	—	

тогда как в обычном $BaTiO_3$—превысили 20%. Диэлектрические потери в диапазоне радиочастот в мелкозернистом титанате бария падают с повышением температуры свыше 25° С.

В литературе имеются данные и о других многочисленных материалах на основе титаната бария, обладающих высокой диэлектрической проницаемостью и применяемых для миниа-



Фиг. 101. Образцы для определения основных параметров сегнетокерамики, используемой в слабых полях: *а* — для измерения ε, $\mathrm{tg}\,\delta$, определения температуры, отвечающей максимальной диэлектрической проницаемости, а также для измерения динамического пьезомодуля d_{31}; *б* — для измерения объемного сопротивления ρ_v; *в* — для измерения пробивной напряженности; *г* — для измерения прочности на изгиб и плотности керамики

тюрных конденсаторов с малой нелинейностью. Некоторые из этих видов сегнетокерамики представлены в табл. 7.

Основные свойства сегнетокерамики определяют на партии образцов (фиг. 101). Для измерения $\varepsilon_э$ и $\mathrm{tg}\,\delta_э$ используют не менее 10 образцов; для измерения пьезомодуля d_{31} и удельного объемного сопротивления—не менее 5 образцов. Пробивную напряженность находят как среднее значение для пяти образцов.

41. Дисковые и трубчатые конденсаторы

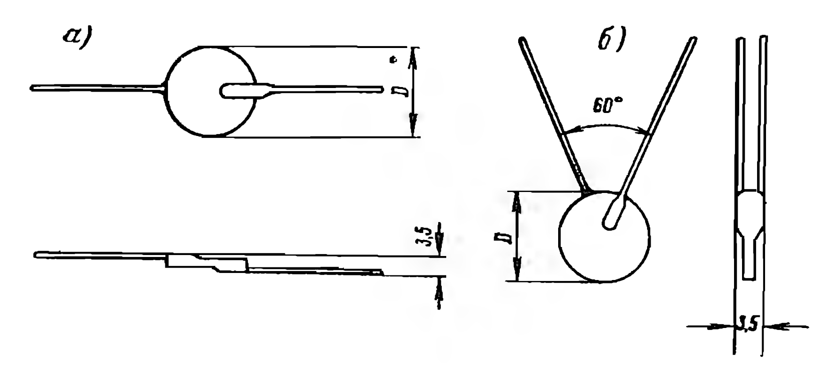
Дисковые конденсаторы изготовляют в основном из керамики СК2, обладающей при нормальной температуре более высокой эффективной диэлектрической проницаемостью в

слабых полях, нежели керамика СК1 или СК3; конденсаторы имеют два типа расположения выводов: по одной прямой и под углом (фиг. 102).

Номинальная и удельная емкости в зависимости от диаметра имеют следующие значения (при частоте $f = 10^3$ *гц* в слабом поле):

D, мм	4	9	12
С, *пф*	1 000	3 000	6 800
$C_{уд}$, *пф/см*³	28 000	13 000	17 000

Для этих конденсаторов, используемых в цепях блокировок низкой частоты и в цепях фильтров, допускают значительные



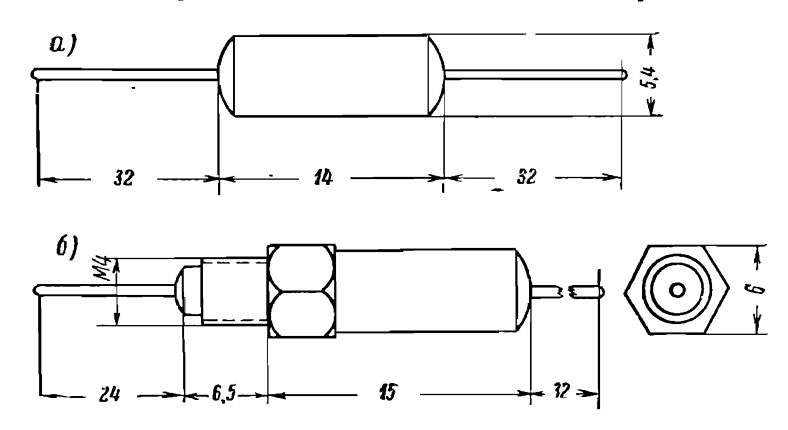
Фиг. 102. Дисковые сегнетоконденсаторы: *а* — расположение выводов по прямой; *б* — расположение под углом

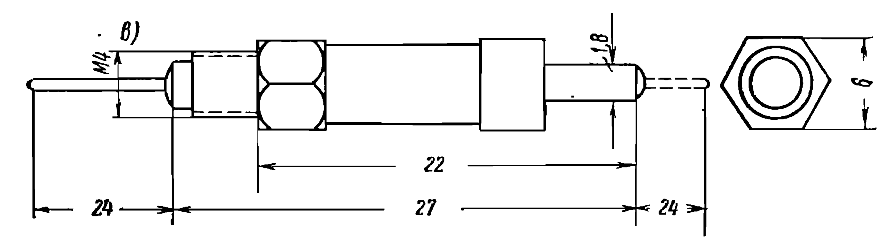
отклонения от номинальной емкости: —40% и +100%. Рабочие температуры конденсатора лежат в интервале от —60° С до +80° С; керамика, применявшаяся для этих конденсаторов, имеет острый температурный максимум, поэтому при крайних значениях температур емкость может снижаться до 20% от номинальной. Номинальное напряжение звуковой частоты составляет 150 *в*, напряжение постоянного тока—250 *в*. При нормальном давлении воздуха испытательное напряжение постоянного тока составляет 500 *в*, переменного тока—300 *в*; при давлении воздуха $p = 90$ *мм* рт. ст. испытательные напряжения снижают: при постоянном токе—250 *в*, при переменном—150 *в*. Тангенс угла потерь при частоте $f = 10^3$ *гц* в слабом поле составляет при нормальной температуре 0,04; после воздействия влажной атмосферы и просушивания $\operatorname{tg} \delta_э = 0{,}07$. Сопротивление изоляции при температуре $t = 20°$ С и напряжении $U = 250$ *в*, измеренное через одну минуту после включения, составляет 10^{10} *ом*, после воздействия влажной среды $R_{из} = 10^9$ *ом*. Конденсаторы выдерживают вибрацию с частотой $f = 50$ *гц* и амплитудой $g = 4g_0$, где g_0—ускорение силы тяжести.

С течением времени может наблюдаться снижение сопротивления изоляции конденсатора. Резкие колебания емкости

при изменении температуры в рабочем диапазоне в настоящее время можно значительно снизить путем использования керамики с незначительной температурной зависимостью диэлектрической проницаемости.

Трубчатые конденсаторы, мало отличаясь по конструкции от трубчатого тикондового конденсатора, имеют по

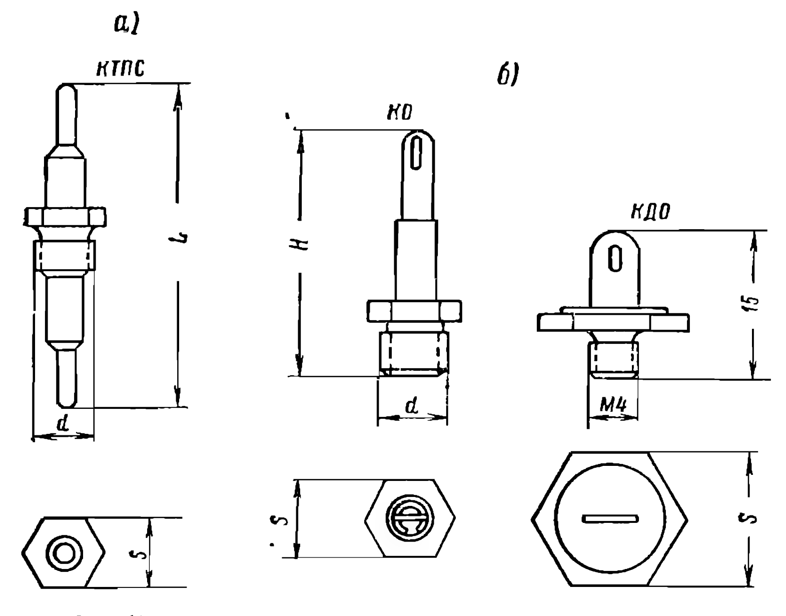




Фиг. 103. Трубчатые опрессованные сегнетоконденсаторы: *а* — с гибкими выводами; *б* — армировка с одной стороны; *в* — армировка с двух сторон

сравнению с ним значительно более высокую емкость. В некоторых случаях для повышения стойкости к динамическим нагрузкам конденсатор опрессовывают в пластмассу; одновременно опрессовка обеспечивает и повышенную влагостойкость конденсатора. При небольшой емкости конденсаторов для их изготовления применяют керамику СК1 или СК3. Опрессованные конденсаторы могут быть конструктивно выполнены различным образом (фиг. 103). Конденсатор имеет гибкие выводы, выходящие из пластмассового корпуса (*а*); конденсатор с одной стороны армирован гайкой и втулкой, снабженной резьбой (*б*); конденсатор снабжен с двух сторон металлической арматурой и имеет как гибкие, так и жесткие выводы (*в*). Емкость конденсатора при указанных на рисунке размерах может дости-

гать 700 *пф* (при частоте $f=10^3$ *гц* и градиенте поля $E=50$ *в/мм*). Удельная емкость для опрессованного неармированного конденсатора невелика, около 2200 *пф/см*^{3}, для армированного конденсатора эта величина еще ниже. Допустимое отклонение емкости от номинальной соответствует III классу и составляет $\pm 20\%$. Конденсаторы предназначены для работы в интервале температур от -60° С до $+90^\circ$ С. При крайних значениях



Фиг. 104. Сегнетоконденсаторы: *а* — трубчатые проходные; *б* — опорные

температур емкость значительно снижается, однако, использование сегнетокерамики с более слабой температурной зависимостью диэлектрической проницаемости позволит обеспечить колебание емкости в пределах $\pm 20\%$ от среднего значения. Имея номинальное напряжение постоянного тока $U_= = 400$ *в*, конденсаторы, испытываемые при нормальном давлении воздуха, выдерживают $U_= = 800$ *в*, а при давлении 5 *мм* рт. ст.— 480 *в*. Измеренное при напряжении $U_= = 250$ *в* через одну минуту после включения сопротивление изоляции при температуре $t=20^\circ$ С — $\rho_V=10^{10}$ *ом*, а при $t=90^\circ$ С $\rho_V=5\cdot 10^8$ *ом*. Конденсатор хорошо противостоит воздействию вибрации и тропической влажности (температура $t=+40^\circ$ С, влажность $\varphi=98\%$), воздействию температур, изменяющихся в следующей последовательности: $+20^\circ$ С; -60° С; $+20^\circ$ С; $+90^\circ$ С; $+20^\circ$ С. Конденсаторы с течением времени обнаруживают изменения емкости

и сопротивления изоляции. Примерно через 1000 часов работы в аппаратуре емкость может измениться на 30%, а сопротивление изоляции снизится на 75%. Из сегнетокерамики также изготовляют некоторые конденсаторы узкого назначения. К ним относятся трубчатые проходные конденсаторы, которые используются в качестве небольших проходных изоляторов, причем одновременно они обеспечивают заданную емкость между проводником и корпусом.

Керамические трубчатые проходные конденсаторы (фиг. 104, *а*) часто рассчитаны на напряжение постоянного тока $U_= = 300$ *в* и могут иметь значения емкости, указанные в табл. 8.

Таблица 8

Емкость *C*, *пф*	Размеры, *мм*		
	L	*S*	*d*
3 600	28	6	5
4 300	28	7	6
10 000	40	10	8

Емкость проходных конденсаторов определяют при небольшом напряжении ($U_\sim \leqslant$ 15 *в*) при частоте 10^3 *гц*. Величина емкости в диапазоне температур от —10 до +60° С может быть меньше номинальной (при 20° С) на 30%, а при температурах от —60 до +70° С—меньше на 60%. В нормальных условиях сопротивление изоляции составляет около $5 \cdot 10^8$ *ом*, а после воздействия влаги — 10^8 *ом*. Испытательные напряжения для указанных проходных конденсаторов при нормальном давлении (760 *мм* рт. ст.) составляет 1000 *в*, а при давлении $p=40$ *мм* рт. ст.— 400 *в* постоянного тока. Конденсаторы этого типа хорошо переносят действие тропической влажности ($t=+60°$ С, влажность $\varphi=96\%$) и вибрации с большим ускорением.

Другим типом конденсатора является дисковый опорный (фиг. 104, *б*); с помощью этого конденсатора получают возможность закрепить проводник и обеспечить нужную емкость между участком монтажных соединений и корпусом радиоаппарата.

Керамические опорные конденсаторы часто рассчитаны на напряжение постоянного тока $U_= = 300$ *в*. В зависимости от размеров их емкость имеет значения, указанные в табл. 9.

Таблица 9

Тип	Емкость *C*, *пф*	Реактивная мощность *вар*	Размеры, *мм*		
			S	*d*	*H*
КО	270—1800	50	6	М5	18
	680—3600	75	7	М6	21
КДО	430— 680	75	9	—	—
	680—1100	75	11	—	—

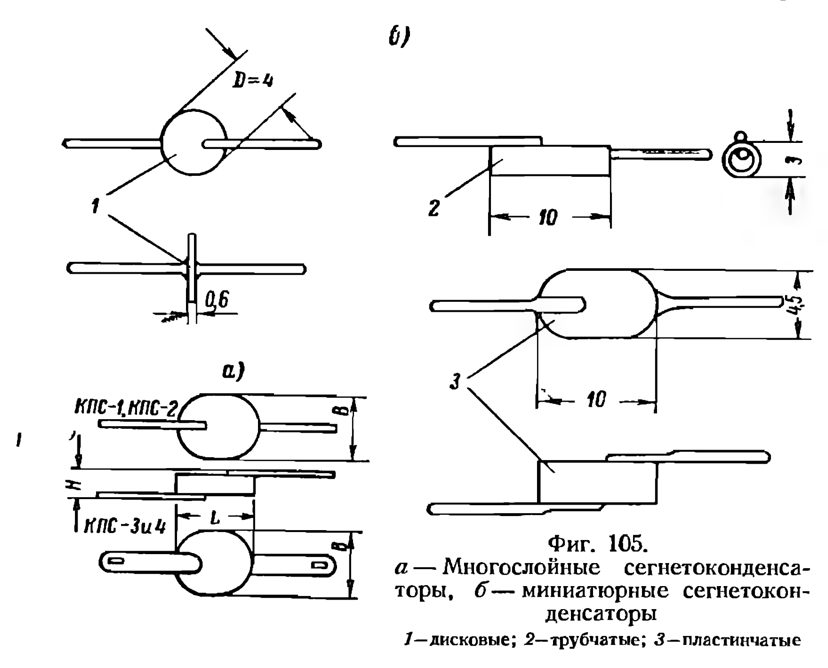
Емкость конденсатора при изменении температур в пределах от —60 до +85° С может снизиться по сравнению с но-

минальной (при 20 С) на 60%. Емкость измеряют в слабом поле при частоте 10^3 *гц*. Сопротивление при нормальных условиях равно $5\cdot10^8$ *ом*, а при температуре $+85^\circ$ С или после действия влаги составляет 10^8 *ом*. Конденсаторы этого типа испытывают напряжением $U_= = 800$ *в* при нормальном давлении воздуха и напряжением $U_= = 350$ *в* при давлении 40 *мм* рт. ст.

Конденсаторы выдерживают без появления механических повреждений и нарушения электрической прочности действия циклических изменений температуры (от -60° С до $+85^\circ$ С) и хорошо противостоят воздействию тропической влажности ($t = +60^\circ$ С, влажность $\varphi = 95\%$) и вибрации.

42. Многослойные блочные конденсаторы

Получение керамических конденсаторов значительной емкости достигается путем соединения в параллель нескольких одноэлементных конденсаторов. Такие блочные конструкции



Фиг. 105.
а — Многослойные сегнетоконденсаторы, *б* — миниатюрные сегнетоконденсаторы
1 — дисковые; *2* — трубчатые; *3* — пластинчатые

могут быть получены из трубчатых и плоских элементов. Технология конденсаторной керамики позволяет изготовить трубку небольшого диаметра с меньшей толщиной стенки, нежели плоского конденсатора, оформляемого методом обычной прессовки. Поэтому удельная емкость выпускаемого трубчатого конденсатора типа КТК в 2—3 раза больше, чем удельная

емкость плоского конденсатора типа КДК. При увеличении диаметра трубки приходится увеличивать толщину стенки по технологическим соображениям. Поэтому блок концентрически расположенных трубок характеризуется сравнительно большой удельной емкостью. Существенным достоинством обладает другая конструкция блока, в которой используются плоские конденсаторы. Достигнутая в настоящее время возможность получения тонкослойных керамических пластинок, как уже указывалось, позволяет разработать многослойный блочный конденсатор с высокими значениями номинальной и удельной емкости (см. параграф 32). Примером могут служить конденсаторы на напряжение 250 *в* постоянного тока (фиг. 105, *а*), которые характеризуются данными, приведенными в табл. 10.

Таблица 10

Тип конденсатора	Номинальная емкость *C*, *пф*	Допустимое отклонение емкости, %	Размеры, *мм*		
			L	*B*	*H*
КПС-1	510... 3 600	—40 +100	7	5,5	6
КПС-2	3 900... 7 500		10	8	7
КПС-3	8 200...15 000		13,5	11	7
КПС-4	18 000...40 000		17,5	14,5	8

Количество плоских элементов, соединяемых параллельно, достигает пяти. Толщина керамики (минимальная) составляет 0,3 *мм*. Пластинки имеют овальную форму, что удобнее в производстве. Сегнетокерамика, используемая для изготовления этих конденсаторов, имеет значение диэлектрической проницаемости при нормальной температуре порядка 4000. При этих условиях удельная емкость конденсаторов этого типа достигает значения $C_{уд}=7{,}8\cdot 10^4$ *пф/см*^{3}.

43. Миниатюрные конденсаторы

Создание малогабаритных узлов радиоаппаратуры связано с разработкой радиодеталей, обладающих исключительно малыми размерами.

Последние годы характеризуются появлением новых типов электронных ламп, а также полупроводниковых диодов и триодов, обладающих весьма небольшими габаритами. Потребность в конденсаторах с уменьшенным объемом и весом, необходимых для полупроводниковой техники, в значительной мере удовлетворяется за счет миниатюрных сегнетоконденсаторов.

Отличительной чертой миниатюрных сегнетоконденсаторов является их значительная емкость при сравнительно небольшом объеме; миниатюрные сегнетоконденсаторы могут

обладать весьма высокой удельной емкостью. Это достигается использованием сегнетокерамики с ее высокой диэлектрической проницаемостью, внедрением более совершенной конструкции и технологии производства сегнетоконденсаторов, а также уменьшением рабочих и испытательных напряжений. Основным диэлектриком, используемым в миниатюрных сегнетоконденсаторах, является титанат бария (мелкозернистый), а также твердые растворы на основе титаната бария, в частности СМ-1 (см. параграф 40). Для конденсаторов с невысокой номинальной емкостью может быть использована керамика группы КС1 и КС3.

Миниатюрный сегнетоконденсатор может иметь форму диска (тип КДМ), трубки (КТМ) или представлять собой блок из нескольких параллельно соединенных и спаянных между собой тонких керамических пластинок овальной формы (типа КПМ) (фиг. 105, *б*).

Номинальная емкость $C_н$ (эффективная) миниатюрных сегнетоконденсаторов при температуре $t=20°$ С, частоте $f=10^3$ *гц* и напряжении 10 ... 15 *в* характеризуется следующими данными. Дисковый конденсатор (диаметр диска 4 *мм*): $C_н=500$ ... 1500 *пф*. Трубчатый конденсатор (трубка диаметром 3,5 *мм*, длиной 10 *мм*): $C_н=500$ ... 3000 *пф*. Пластинчатый конденсатор, имеющий размеры в плане 4×10 *мм*, обладает емкостью: при толщине 3 *мм* $C_н=12\,000$ *пф*; при толщине 4 *мм* $C_н=20\,000$ *пф*; при толщине 5 *мм* $C_н=30\,000$ *пф*.

Отклонения от номинального значения емкости могут составлять $\pm 10\%$ (класс II) и $\pm 20\%$ (класс III).

Удельная емкость достигает в миниатюрных конденсаторах следующих значений (без учета объема выводов):

дисковый $C_{уд} \leqslant 2\cdot 10^5$ *пф/см*^{3};

трубчатый $C_{уд} \leqslant 4{,}2\cdot 10^4$ *пф/см*^{3};

пластинчатый (при высоте 5 *мм*) $C_{уд}=1{,}5\cdot 10^5$ *пф/см*^{3}.

Таким образом, миниатюрные конденсаторы в отношении удельной емкости превосходят бумажные конденсаторы, имеющие небольшую номинальную емкость. В литературе имеются данные о разработанных конденсаторах этого типа с удельной емкостью $3\cdot 10^5$ *пф/см*^{3} [Л. 77]. Конденсаторы предназначены для работы в интервале температур от -40 до $+70°$ С. При крайних значениях температуры емкость значительно снижается и может составить согласно техническим условиям 30% от номинальной; можно ожидать, что в ближайшем будущем путем использования новых видов сегнетокерамики удастся уменьшить величину отклонений емкости от номинальной. Заметим, что, применяя керамику СМ-1, получают значительно меньшие отклонения емкости от номинального значения; при температуре $-40°$ С емкость, измеренная на производственной партии, составляет 60 ... 70% от номинальной, а при $+70°$ С — около 80% от емкости при 20° С.

Номинальное напряжение конденсаторов составляет 60 *в* постоянного тока. При нормальном давлении воздуха конденсаторы испытывают в течение 10 сек. напряжением $U_{исп}=200$ *в*, а при давлении 5 *мм* рт. ст. — $U_{исп}=75$ *в* в течение одной минуты. Напряжение от нуля до испытательного должно подниматься за 2 . . . 5 сек.

Потери в конденсаторах при температуре $t=20°$ С, частоте $f\approx 10^3$ *гц* и напряжении 10 . . . 15 *в* характеризуются следующими данными. В исходном состоянии при влажности воздуха $\varphi \leqslant 70\%$ $\text{tg}\,\delta_э \leqslant 0{,}04$; после 24-часового пребывания в воде, обтирания фильтровальной бумагой, а также после продувки для трубчатых конденсаторов и кратковременной сушки $\text{tg}\,\delta_э \leqslant 0{,}08$.

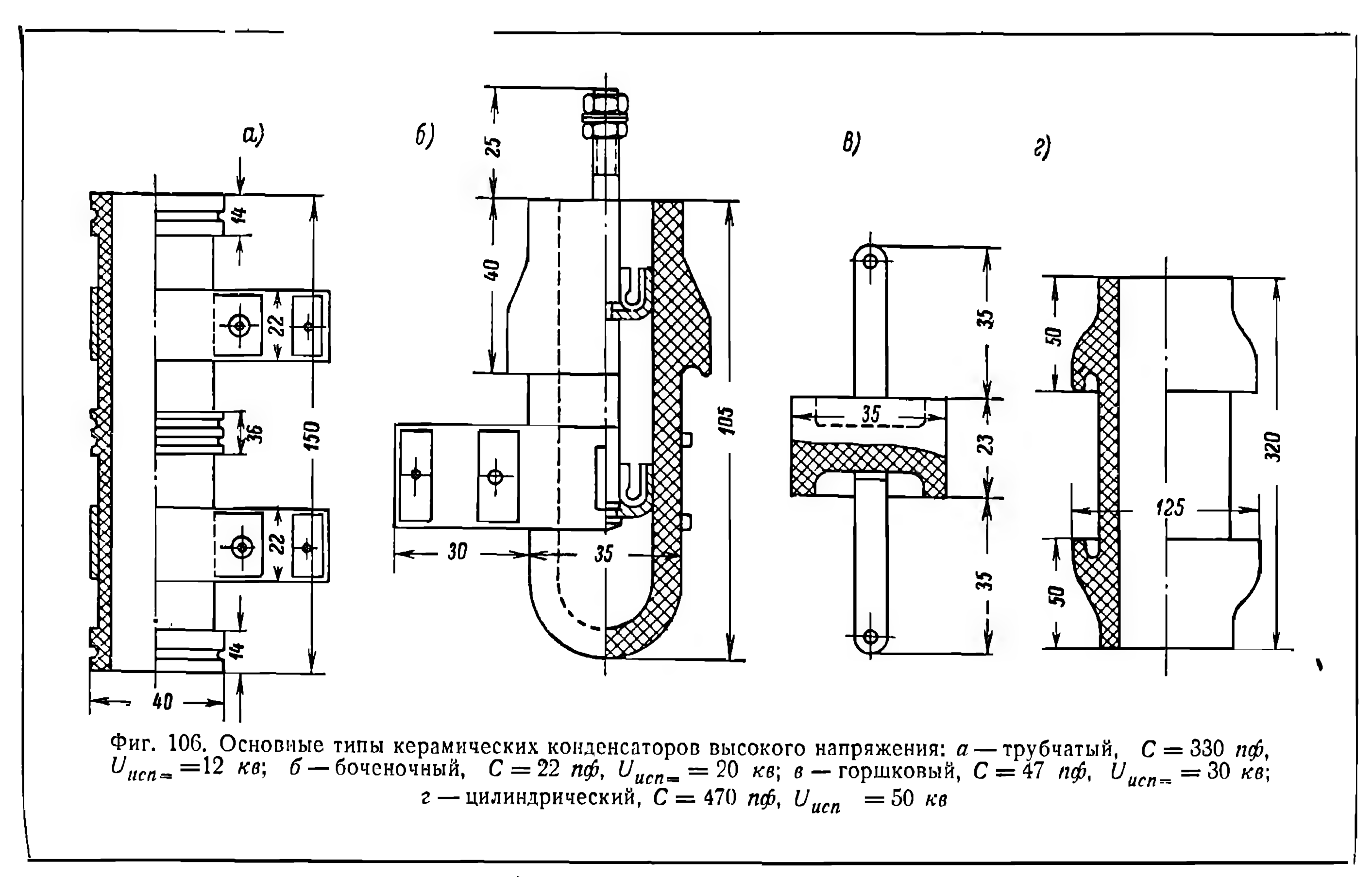
В исходном состоянии сопротивление изоляции $R_{из} \geqslant 5 \cdot 10^8$ *ом* (при измерениях через минуту после включения напряжения $U=100$ *в*). После пребывания в воде (как и при измерениях $\text{tg}\,\delta_э$) сопротивление изоляции $R_{из}=10^8$ *ом*. Имея небольшие размеры и массу, конденсаторы способны без изменения емкости более, чем на 20%, выдерживать значительные ускорения при вибрации частотой 50 *гц* — до $15g_0$. Конденсаторы легко могут переносить циклические изменения температуры в следующей последовательности: +20° С; —40° С; +20° С; +70° С; +20° С и выдерживать после этого испытательное напряжение 200 *в*; кратковременно работать при высокой влажности воздуха ($\varphi=98\%$), при нормальной температуре и напряжении 60 *в* постоянного тока. При непродолжительном действии тропической влажности ($\varphi=98\%$; $t=+60°$ С) на конденсаторах не обнаруживается каких-либо повреждений.

Миниатюрные конденсаторы могут быть использованы в радиоаппаратуре в качестве разделительных и блокировочных при частотах до 5 *мггц*, а также в цепях автоматики, контроля и управления.

44. Боченочные конденсаторы

Конденсаторы высокого напряжения, изготовляемые из керамических масс с повышенным значением диэлектрической проницаемости (например из тиконда), имеют меньшие габариты, чем слюдяные конденсаторы — в диапазоне емкостей не свыше 1000 ... 2000 *пф*. Особенностью керамического конденсатора высокого напряжения является возможность выравнивания поля у краев электрода путем утолщения диэлектрика и создания надлежащей конфигурации электродов (фиг. 106). Это позволяет, в отличие от слюдяного конденсатора, повысить рабочее напряжение в единице, не прибегая к последовательному соединению двух или нескольких единиц.

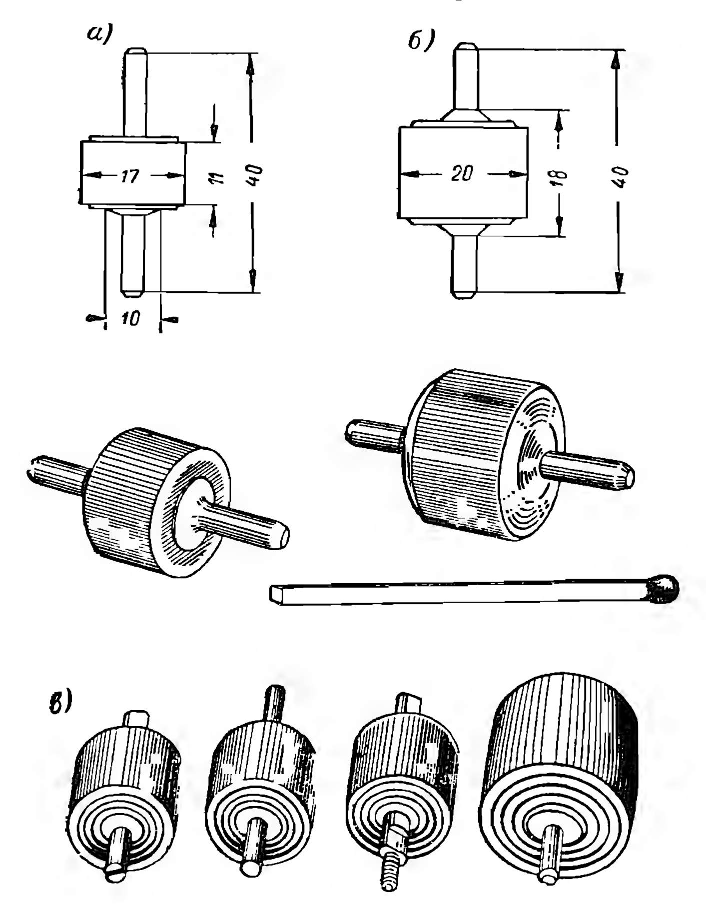
Дальнейшее развитие применения керамических масс с высокой диэлектрической проницаемостью в конденсаторах высо-



Фиг. 106. Основные типы керамических конденсаторов высокого напряжения: *а* — трубчатый, $C = 330$ *пф*, $U_{исп=} = 12$ *кв*; *б* — боченочный, $C = 22$ *пф*, $U_{исп=} = 20$ *кв*; *в* — горшковый, $C = 47$ *пф*, $U_{исп=} = 30$ *кв*; *г* — цилиндрический, $C = 470$ *пф*, $U_{исп} = 50$ *кв*

кого напряжения привело к использованию для этой цели сегнетокерамики.

Как уже указывалось, наиболее высокой теплоотдачей обладает боченочный конденсатор, у которого поверхность охлаждения состоит не только из поверхности обкладок, но и



Фиг. 107. Сегнетоконденсаторы боченочного типа, опрессованные пластмассой, емкостью 500 *пф*, на рабочее напряжение постоянного тока 12 *кв*: *а* — до опрессовки; *б* — после опрессовки; *в* — конденсаторы на 20 и 30 *кв*

из относительно большой боковой поверхности, не покрытой металлом. Однако конденсатор боченочного типа из тиконда имеет относительно невысокую емкость. Увеличения емкости можно достигнуть, если применить для изготовления конденсатора сегнетокерамику.

Заметим, что относительно большая поверхность охлаждения и возможность выравнивания поля на краях особенно вид-

ную роль играют в случае использования сегнетокерамики с ее высокими значениями $\varepsilon_э$ и $\operatorname{tg} \delta_э$. Боченочные конденсаторы изготовляют в основном из керамики СК2. Конденсатор имеет жесткие цилиндрические выводы, а для повышения напряжения перекрытия и обеспечения влагостойкости его опрессовывают смолой типа капрон (фиг. 107). Номинальная емкость конденсатора при 20 С, частоте $f=10^3$ *гц* и градиенте поля около $E=30$ *в/см* составляет не менее 300 *пф*. Эффективная емкость конденсатора при $+20°$ С при частоте 50 *гц* и градиенте поля $E=3000$ *в/см* составляет не менее 500 *пф*. Поскольку рабочая температура для этого конденсатора не превосходит 40° С—уменьшения емкости при этой температуре не наблюдается. Рабочие температуры для конденсатора этого типа лежат в пределах от $+15$ до $+70°$ С. Колебания емкости при изменениях температуры не приводят к уменьшению эффективной емкости ниже 300 *пф*. Номинальное напряжение постоянного тока для конденсатора (12 *кв*) установлено из следующих соображений. Пробивной градиент сегнетокерамики СК2 при постоянном токе на образцах толщиной 2 *мм* составляет около $E_{пр}=30$ *кв/см* (табл. 6); выбирая коэффициент запаса $k_1=3$, получают рабочую напряженность $E_{н=}=10$ *кв/см* и номинальное напряжение конденсатора при толщине 12 *мм* $U_{н=}=12$ *кв*. Испытательное напряжение постоянного тока составляет $U_{=}=17$ *кв*. Используя оболочку из капрона, обеспечивают отсутствие частичных разрядов у краев электродов при номинальном, а также испытательном напряжениях. Заметим, что после случайного перекрытия опрессованного конденсатора напряжение поверхностного разряда при вторичном испытании снижается до величины, соответствующей разряду по поверхности неопрессованного конденсатора, хотя никаких видимых повреждений слоя капроновой смолы, покрывающей конденсатор, не обнаруживается. Таким образом, при непредвиденном повышении напряжения, сопровождающемся перекрытием по поверхности, защитные свойства капроновой оболочки исчезают. При пониженном давлении воздуха повышенным напряжением конденсатор не испытывают. Тангенс угла потерь конденсатора не определяют, так как этот параметр для данного типа конденсатора не играет роли. Сопротивление изоляции конденсатора в нормальных условиях при напряжении $U_{=}=500$ *в* составляет не менее $5 \cdot 10^8$ *ом*. Для проверки возможности длительной работы конденсатор выдерживают 4 часа при температуре 70° и напряжении постоянного тока 12 *кв*, после чего не должны ухудшаться свойства конденсатора.

Боченочные конденсаторы предназначены для использования в цепях постоянного тока при наличии весьма небольшой переменной составляющей напряжения. Они применяются в качестве анодно-разделительных в телевизионных приемни-

ках и в схемах электроники. Конденсаторы этого типа емкостью 500 *пф* выпускаются также на напряжения постоянного тока 20 и 30 *кв* (фиг. 107, *в*). Удельная емкость (без учета объема выводов) боченочного конденсатора при значениях $C=500$ *пф*, $U_{н=}=12$ *кв* равна 80 *пф/см*³. Для того чтобы оценить преимущества этого конденсатора в отношении занимаемого объема, приведем данные для аналогичного слюдяного конденсатора. Разделительный слюдяной конденсатор типа КР емкостью $C=$ $=470$ *пф* на напряжение 10 *кв* постоянного тока имеет диаметр 70 *мм* и высоту 116 *мм*; при этом его удельная емкость составляет около 1 *пф/см*³, т. е. в 80 раз меньше, чем у сегнетокерамического конденсатора. Вдобавок следует учесть более простую технологию производства керамических конденсаторов, отсутствие необходимости в дефицитных материалах и более низкую стоимость по сравнению со слюдяными конденсаторами.

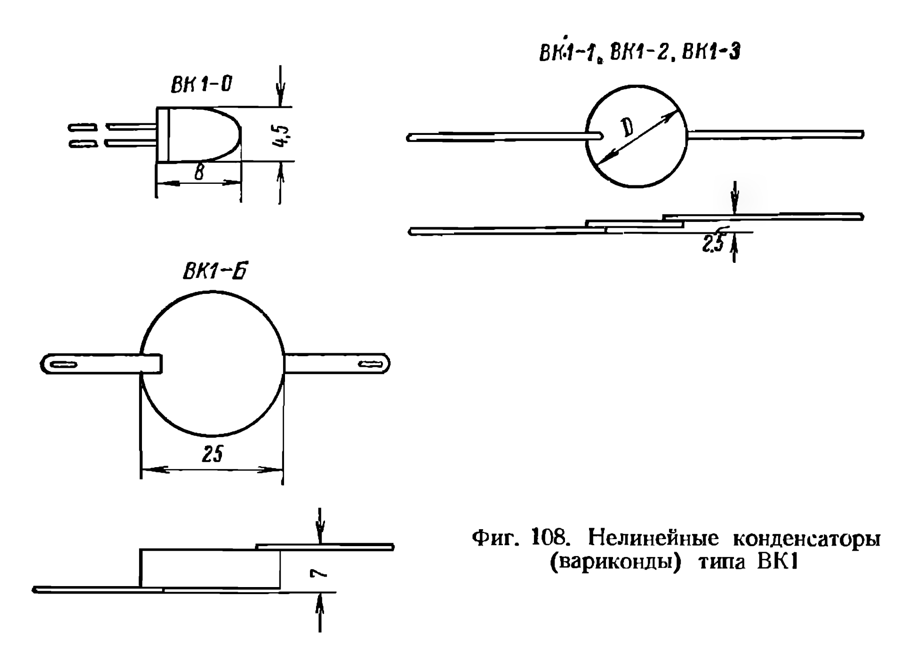
Получение более высоких емкостей связано с увеличением площади электродов, при этом боченочный конденсатор приближается к дисковому типу и его преимущества исчезают. Сегнетоконденсатор высокого напряжения емкостью 0,02 ... 0,1 *мкф* изготовляют иногда цилиндрического типа (фиг. 106), причем в отличие от трубчатого, оформляемого вытяжкой, цилиндрический конденсатор изготовляют путем формования или литья. Заготовку затем протачивают для получения выступов, обеспечивающих высокое разрядное напряжение. При этом условия теплоотдачи лучше, чем в случае горшкового конденсатора, и в отношении поверхности охлаждения они приближаются к условиям боченочного конденсатора.

В литературе имеются сообщения о подобных сегнетоконденсаторах цилиндрического типа, используемых в схемах заряда—разряда на амплитудное напряжение 10 *кв*. При наружном диаметре 50 *мм* и длине 175 *мм* конденсатор имеет емкость $C_{=}=24\,000$ *пф*. Ввиду высокой диэлектрической проницаемости сегнетокерамики высока емкость, отнесенная к единице поверхности; конденсатор обладает весьма малой индуктивной составляющей полного сопротивления даже при весьма высоких частотах. Благодаря этому конденсатор весьма быстро заряжается и быстро разряжается на малое сопротивление. Время подъема напряжения на конденсаторе от нуля до максимума составляет 10^{-7} сек. При разряде на искровой промежуток можно обеспечить снижение напряжения от максимального в e раз за $2\cdot10^{-7}$ сек.

45. Нелинейные конденсаторы

В конденсаторах этого типа используется сегнетокерамика с резко выраженной зависимостью диэлектрической проницаемости от напряженности переменного и постоянного полей. Нелинейные конденсаторы именуют иногда варикондами.

Вариконды типа ВК1 были разработаны Т. Н. Вербицкой. Конденсаторы типа ВК1 выполнены из сегнетокерамики на основе титаната бария с добавкой окиси олова; температура точки Кюри для этой керамики составляет около 70 ± 5° С. Эти конденсаторы согласно временным техническим условиям производятся в двух конструктивных вариантах: в виде дисков и в виде блоков.



Фиг. 108. Нелинейные конденсаторы (вариконды) типа ВК1

Дисковые конденсаторы рассчитаны на номинальное напряжение постоянного тока $U_{=}=250$ *в* или напряжение переменного тока частотой $f=50$ *гц* $U_{\sim}=160$ *в*. Диапазон рабочих температур от —40 до +60° С. При толщине диска 0,5 . . . 0,6 *мм* номинальная емкость, измеренная при частоте $f=10^3$ *гц*, напряжении $U_{\sim}=5$ *в* и температуре 20° С, в зависимости от диаметра диска (фиг. 108) имеет следующие значения (табл. 11):

Таблица 11

Обозначение конденсатора	ВК1-0	ВК1-1	ВК1-2	ВК1-3
Диаметр диска, *мм* . . .	2	4	9	16
Емкость эффективная, *пф*	100	{ 510 1500	2700 5100	6800 12000

Отклонение от номинального значения емкости допускается в пределах от —40 до +100%. При наиболее низкой температуре, т. е. при $t = -40°$ С емкость составляет не менее 20% от значения при нормальных условиях ($t = 20°$ С); при температуре $t = +60°$С отклонения емкости конденсатора от значения при 20° С могут составить от —20 до +70%. Вначале производят измерения емкости при $t = 60°$ С, а затем при $t = -40°$ С.

Емкость конденсатора изменяется при изменении приложенного напряжения. Отношение емкости при переменном напряжении 30 *в* (C_{30}) к емкости при 5 *в* (C_5)—емкостная нелинейность для ВК1-0 составляет $N_{емк} = 2$, а для ВК1-1 ... ВК1-3 $N_{емк} = 2{,}5$. Отношение емкости при напряжении 70 *в* (C_{70}) к емкости при 5 *в* (C_5) для ВК1-0 составляет 3 ... 5, для ВК1-1—от 4 до 6. При напряжении 70 *в* емкость этих конденсаторов достигает наибольшего значения, а при дальнейшем увеличении напряжения начинает снижаться. Аналогично для конденсаторов ВК1-2 и ВК1-3 это напряжение составляет 100 *в*, и отношение емкости при 100 *в* (C_{100}) к емкости при 5 *в* (C_5) также лежит в пределах 4 ... 6. Измерение емкости при указанных напряжениях выполняется на мосте МТЕ при частоте 50 *гц*.

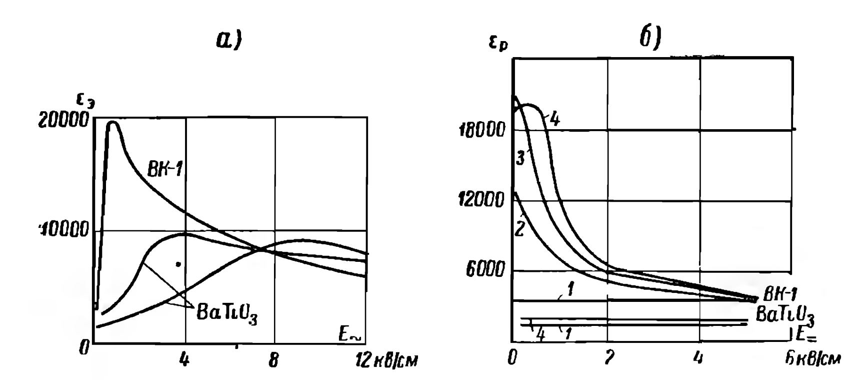
Тангенс угла потерь дисковых конденсаторов при нормальных условиях: частоте $f = 10^3$ *гц* и напряжении 5 *в* не превосходит 0,18; при температуре $t = 60°$ С или после воздействия влаги (погружение на 24 часа в воду, обтирание, двухчасовое просушивание при 20° С) $\operatorname{tg} \delta_э \leqslant 0{,}2$.

Сопротивление изоляции при постоянном напряжении 100 ... 250 *в* (отсчет через одну минуту) для нормальных условий составляет $R_{из} \geqslant 10^{10}$ *ом*, после действия влаги $R_{из} \geqslant 10^9$ *ом*. Испытательное напряжение при давлении воздуха 750 ± 30 *мм* рт. ст. составляет $U_= = 500$ *в* или $U_\sim = 300$ *в* ($f = 50$ *гц*); оно поднимается от нуля за 5 сек., после чего конденсатор выдерживается под напряжением 10 сек. При пониженном давлении — $p = 90$ *мм* рт. ст. к конденсатору прикладывают напряжение $U_= = 260$ *в* или $U_\sim = 160$ *в* ($f = 50$ *гц*) на одну минуту. Конденсаторы выдерживают значительную вибрацию с частотой 50 *гц* и длительное воздействие тропической влажности ($\varphi = 95 \ldots 98\%$, $t = 60°$ С, $\tau = 250$ час.).

Блочные конденсаторы (ВК1-Б) состоят из 7 ... 9 параллельно соединенных дисков. Номинальное напряжение постоянного тока составляет $U_= = 300$ *в*, напряжение переменного тока $U_\sim = 160$ *в*. Рабочие температуры лежат в диапазоне от —40 до +50° С. Номинальная емкость при температуре $t = 20°$ С и при частоте $f = 50$ *гц* и напряжении $U_\sim = 5$ *в* составляет 0,15 и 0,20 *мкф*. Допустимые отклонения от номиналь-

ного значения емкости при понижении температуры до —40°С и при повышении температуры до +50° С — те же, что и для дисковых конденсаторов типа ВК1. Емкость конденсаторов ВК1-Б возрастает при повышении напряжения: до 30 *в* — в 2,5 раза; до 100 *в* — в 4—6 раз по сравнению с емкостью при напряжении $U=5$ *в*. Емкость измеряют при частоте $f=50$ *гц* на мосте типа МТЕ.

Тангенс угла потерь конденсаторов ВК1-Б при нормальных условиях: частоте $f=50$ *гц* и напряжении 5 *в* не превосходит



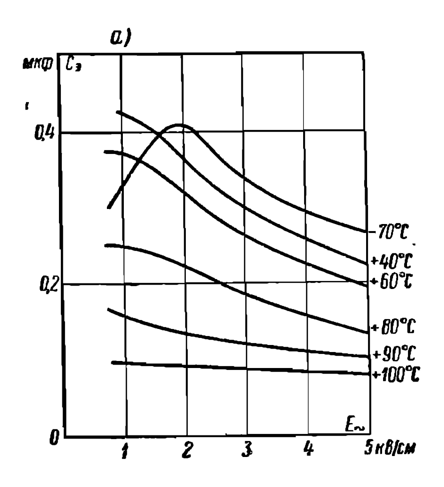
Фиг. 109. Зависимости диэлектрической проницаемости керамики ВК1 и титаната бария от напряженности поля: *а* — эффективная диэлектрическая проницаемость; измерения мостовым методом; *б* — реверсивная диэлектрическая проницаемость при различных переменных полях ($f=10^3$ *гц*, $t=20°$ С)

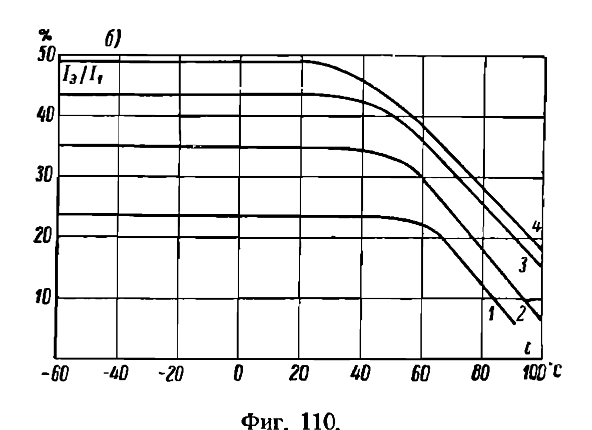
1) $E_\sim=15$ *в/см*; *2)* $E_\sim=150$ *в/см*; *3)* $E_\sim=450$ *в/см*; *4)* $E_\sim=700$ *в/см*

0,25; при температуре $t=50°$ С $\mathrm{tg}\,\delta_э=0,4$; после воздействия влаги $\mathrm{tg}\,\delta_э \leqslant 0,5$. Сопротивление изоляции при постоянном напряжении 100 . . . 250 *в* в нормальных условиях составляет $R_{из} \geqslant 10^9$ *ом*, после действия влаги $R_{из} \geqslant 10^8$ *ом*. Испытательные напряжения—те же, что и для дисковых конденсаторов.

Сравнение свойств вариконда ВК1 с некоторыми другими сегнетоэлектриками [Л. 78] показывает, что при изменении напряженности переменного поля эффективная диэлектрическая проницаемость керамики ВК1 при температуре около 20° С достигает наибольшего значения 20 000 при градиенте $E=$ $=0,7$ *кв/см*, тогда как для титаната бария наибольшее значение $\varepsilon_э$ составляет 9000, причем для достижения этой диэлектрической проницаемости требуются значительно более сильные поля (фиг. 109). При изменении напряженности постоянного поля, на которое наложено слабое переменное поле, реверсивная диэлектрическая проницаемость может изменяться по-разному в зависимости от величины переменного поля (фиг. 190, *б*). Наибольшее изменение реверсивной диэлектрической проницаемости при температуре около 20° С (измене-

ние примерно в 4 раза) наблюдается при напряженности переменного поля $E=700$ *в/см*. При повышении частоты эти изменения сохраняются до частот порядка 10^7 *гц*. В титанате бария наблюдаемые изменения реверсивной диэлектрической проницаемости при изменении постоянного поля значительно меньше (см. параграф 13). Характер зависимости диэлектрической проницаемости от напряженности поля тесно связан с величиной температуры конденсатора. В связи с высокой эффективной диэлектрической проницаемостью керамики ВК1 (около 3000 при слабом переменном поле) из нее могут быть изготовлены конденсаторы с относительно большой емкостью в единице при малом объеме; при использовании конструкции в виде блока





Фиг. 110.

а — Зависимости эффективной емкости вариконда ВК1 от напряженности поля, снятые при различных температурах; *б* — температурные зависимости (средние для ряда значений) составляющей тока третьей гармоники в процентах от составляющей первой гармоники при различных градиентах синусоидального поля для конденсаторов ВК1; окружающая среда—воздух; $t\approx 20°$ C

1) $E_\sim=1{,}67$ *кв/см*; *2)* $E_\sim=2{,}67$ *кв/см*; *3)* $E_\sim=4$ *кв/см*; *4)* $E_\sim=5$ *кв/см*

плоских конденсаторов может быть достигнута емкость до 1 . . . 5 *мкф*. Существенный интерес представляет вопрос об использовании нелинейных конденсаторов в качестве элементов цепи, для получения несинусоидальной формы кривой тока при

синусоидальном напряжении. Исследования в этом направлении были проведены В. П. Сидоренко под руководством автора на образцах варикондов, изготовленных на опытном заводе.

Изучение зависимости эффективной емкости от напряженности поля, проведенное при различных температурах, показало, что при повышении температуры свыше 40° С быстро начинает исчезать зависимость емкости от переменного напряжения (фиг. 110, *а*). Иными словами, эффективная нелинейность конденсаторов ВК1 быстро падает при повышении температуры в интервале 40 . . . 80° С. Обращает на себя внимание зависимость эффективной диэлектрической проницаемости от напряженности поля при низких температурах (—70° С); такой характер кривой обусловлен тем, что по мере увеличения напряженности поля повышается температура керамики за счет диэлектрических потерь.

Форма кривой тока в цепи с конденсаторами ВК1-3 была исследована как с помощью осциллографа, так и с помощью гармонико-анализатора. При этом были определены составляющие тока нечетных гармоник третьего, пятого, седьмого и девятого порядков. Конденсаторы находились на воздухе, охлаждение было естественное. К блоку конденсаторов ВК1 прикладывалось синусоидальное напряжение, причем параллельно вторичным зажимам повысительного трансформатора включалась линейная емкость в качестве фильтра; напряжение, снимаемое с небольшого последовательно включенного безреактивного сопротивления, воспроизводило форму кривой тока. Из кривой выделялась третья и другие гармоники.

Температурные зависимости тока третьей гармоники (в относительных единицах), снятые при различных напряженностях переменного поля (фиг. 110, *б*), показывают, что с повышением напряженности содержание третьей гармоники в кривой тока увеличивается, достигая почти 50% при $E=5$ *кв/см*; однако с повышением E снижается та наибольшая температура, при которой сохраняется значение $\frac{I_3}{I_1}$; так, при $E=1{,}67$ *кв/см* величина $\frac{I_3}{I_1}=23\%$ удерживается до 60° С; при $E=5$ *кв/см* величина $\frac{I_3}{I_1}$ больше (около 49%), но она начинает снижаться уже при 25° С. Это обстоятельство связано с нагреванием варикондов из-за диэлектрических потерь.

Измерение потерь в нелинейных конденсаторах типа ВК1 в относительно сильных полях было проведено с помощью электростатического ваттметра А. Н. Дмитриевым, причем конденсаторы находились в масле при температуре 18 . . . 20° С. Определялись активная и полная мощность конденсаторов; из этих данных можно вычислить тангенс эффективного угла потерь (см. параграф 4).

Удельные потери $P_{а.уд}$ и $\operatorname{tg}\delta_э$ при частоте $f=10^3$ *гц* имеют в среднем довольно высокие значения для конденсаторов ВК1-2 (табл. 12).

Таблица 12

Напряжение, *в*	30	50	80	100	120	150
$P_{а.уд}$, *вт/см*^{3} .	0,67	2,67	7,1	10,0	13,3	18,9
$\operatorname{tg}\delta_э$	0,48	0,58	0,57	0,52	0,51	0,50

Нелинейные конденсаторы получили за последние годы значительное развитие и с успехом используются в новых разработках в качестве нелинейных элементов в схемах усиления мощности и напряжения, стабилизации напряжения, умножения частоты, а также для целей частотной модуляции, получения импульсных напряжений, для контроля температур и др. Следует ожидать, что дальнейшее совершенствование нелинейных конденсаторов, в частности, снижение потерь в них, обеспечит еще более широкое их применение.

Глава седьмая

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ СЕГНЕТОКОНДЕНСАТОРОВ

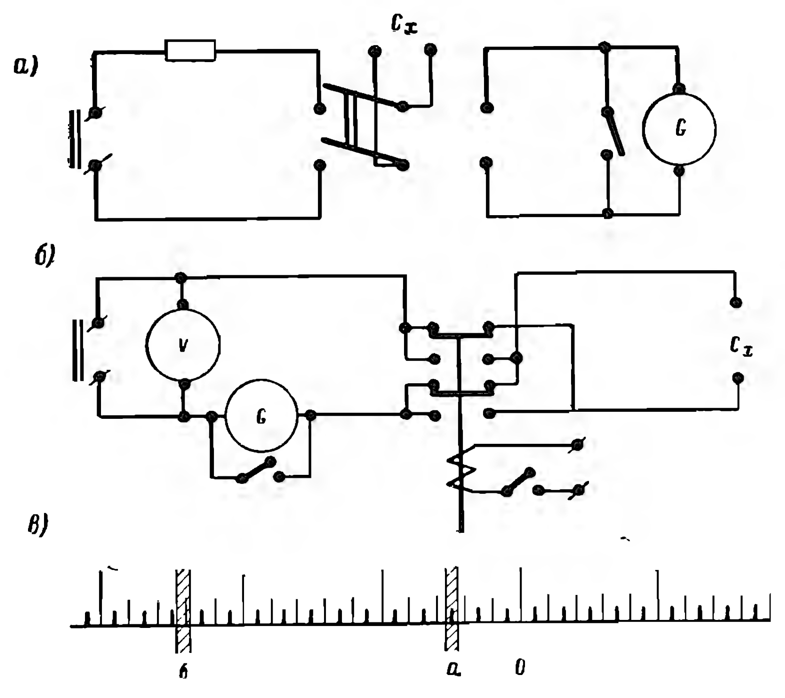
Испытания сегнетоконденсаторов имеют целью установить величины, характеризующие их свойства, наиболее важные для использования этих конденсаторов в аппаратуре. Эти испытания охватывают как электрические, так и механические испытания. Механические испытания не отличаются от аналогичных испытаний линейных конденсаторов. Что касается до электрических испытаний, то они проводятся по-разному в зависимости от того, испытывается ли сегнетоконденсатор со слабо выраженными нелинейными свойствами или сегнетоконденсатор, используемый в качестве нелинейного элемента электрической цепи. Электрические испытания нелинейных конденсаторов имеют ряд существенных особенностей, обусловленных в первую очередь наличием диэлектрического гистерезиса и пьезоэффекта, а также влиянием предшествующего состояния керамики. Детальное исследование сегнетоконденсаторов различных типов представляет собой самостоятельную задачу. Ограничимся основными вопросами электрических испытаний, охватывающими определения емкости и добротности сегнетоконденсаторов и снятия кривых тока и напряжения конденсатора; рассмотрим также измерения пробивного градиента и пьезоэлектрических модулей, проводимые на образцах керамики соответствующей формы.

46. Емкость конденсатора при постоянном напряжении

Нормальная емкость конденсатора при постоянном напряжении представляет отношение заряда на электродах $Q_=$, установившегося по окончании зарядки конденсатора от источника постоянного напряжения $U_=$, к величине этого напряжения

$$C_= = \frac{Q_=}{U_=}; \qquad (165)$$

она требует для своего определения знания величин $Q_=$ и $U_=$. Измерение емкости при постоянном напряжении осложняется из-за наличия электропроводности керамики, поэтому использование обычной схемы с баллистическим гальванометром (фиг. 111, *а*) возможно лишь при малом токе утечки конденсатора. В случае применения обычного двухполюсного рубиль-



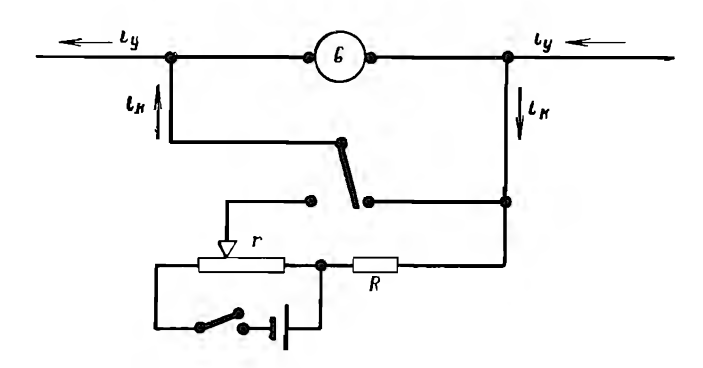
Фиг. 111. Схемы для измерения емкости $C_=$ при постоянном напряжении: *а* — с двухполюсным переключателем; *б* — с быстродействующими реле; *в* — положения световой полоски (зайчика) гальванометра при наличии заметной утечки конденсатора

ника может иметь место заметная погрешность, вызванная утечкой заряда при сравнительно медленном процессе переключения.

Для уменьшения этой погрешности может быть использована схема перезарядки конденсатора с быстродействующим переключением (фиг. 111, *б*); время переключения в современных электромеханических реле может составлять величину, не превышающую $2 \cdot 10^{-3}$ сек. Расположение баллистического гальванометра в схеме фиг. 111, *б* таково, что при перезарядке конденсатора направление тока в гальванометре не изменяется. Включив предварительно разряженный сегнетоконденсатор, переключают с помощью реле напряжение и по

показаниям баллистического гальванометра находят двойной заряд конденсатора $2Q_{=}$. Заметим, что при включении конденсатора в цепи появляется ток утечки, который вызовет смещение зайчика от нуля в положение a' (фиг. 111, *в*); переключение конденсатора сопровождается броском зайчика в положение *б*, после чего он вернется обратно. Разность отсчетов $\overline{oa}$ и $\overline{oб}$ будет соответствовать количеству протекшего при перезарядке электричества.

При значительном начальном смещении зайчика его устанавливают предварительно на нуль, используя схему компенсации



Фиг. 112. Схема компенсации начального отклонения гальванометра

(фиг. 112). Подключив параллельно гальванометру небольшую батарею с высокоомным потенциометром и перемещая его движок, устанавливают зайчик на нуль. В этом случае градуировку гальванометра следует производить с включенным параллельно сопротивлением $R+r$.

Во многих случаях представляет интерес измерение неравновесной емкости конденсатора в период его разряда на активное сопротивление. Эта емкость изменяется в процессе разряда [Л. 79.]

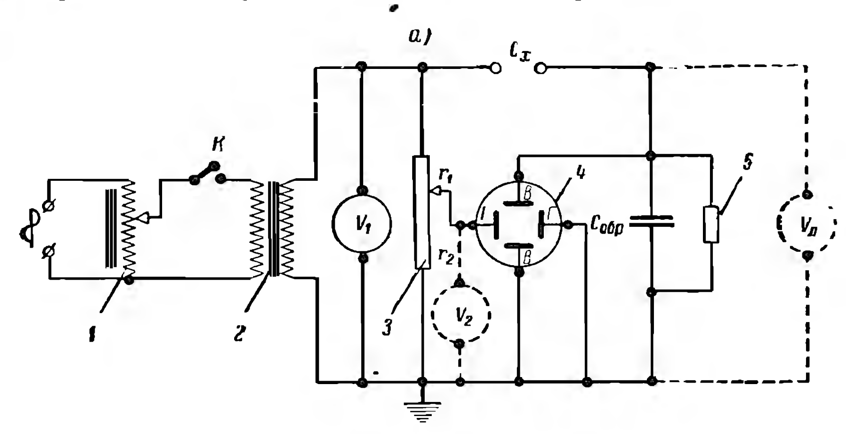
Существенное значение имеет полная разрядка сегнетоконденсатора до испытаний; наличие предшествующей поляризации сказывается на результатах измерения, так как свойства сегнетокерамики зависят от ее „предистории".

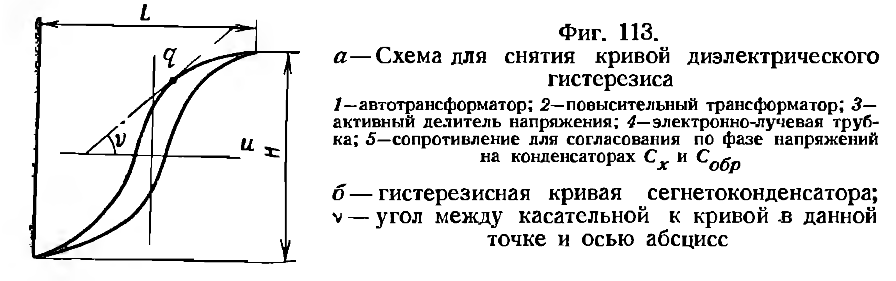
Для того, чтобы полностью разрядить сегнетоконденсатор, его замыкают накоротко и нагревают до 150 ... 200° С, выдерживая при этой температуре 10 ... 15 минут; благодаря увеличению электропроводности керамики конденсатор быстро разряжается. После охлаждения конденсатора, для того чтобы установить, разрядился ли он полностью, его присоединяют к чувствительному электростатическому вольтметру с высо-

ким входным сопротивлением и малой входной емкостью; если при нагревании конденсатора до 100° С вольтметр не дает отклонений, то можно считать конденсатор разряженным.

47. Емкость и добротность конденсатора при переменном напряжении

Для определения при переменном напряжении емкости и добротности сегнетоконденсатора, а также его потерь и реактивной мощности получил распространение ряд методов. Рассмотрим осциллографический и мостовой—резонансный методы,





Фиг. 113.
а — Схема для снятия кривой диэлектрического гистерезиса

1—автотрансформатор; *2*—повысительный трансформатор; *3*—активный делитель напряжения; *4*—электронно-лучевая трубка; *5*—сопротивление для согласования по фазе напряжений на конденсаторах C_x и $C_{обр}$

б — гистерезисная кривая сегнетоконденсатора; ν — угол между касательной к кривой в данной точке и осью абсцисс

а также метод амперметра—вольтметра. Измерения при сверхвысоких частотах требуют применения колебательных систем в виде объемных резонаторов и здесь не рассматриваются.

Цепь, в которую включен сегнетоконденсатор, должна иметь электрическое сопротивление для переменной составляющей основной частоты во много раз меньше, чем сопротивление конденсатора.

Осциллографические измерения производятся при помощи электронного осциллографа (фиг. 113, *а*), например типа ЭО7. Напряжение, подводимое к схеме, регулируется с

помощью автотрансформатора *1* (типа ЛАТР) и повышается при помощи трансформатора *2*. К зажимам трансформатора присоединяют испытуемый конденсатор C_x и образцовый $C_{обр}$, включенные последовательно; выбирают $C_{обр} \gg C_x$, поэтому все напряжение, измеряемое вольтметром V_1, практически приложено к испытуемому образцу. Обычно потери в конденсаторе $C_{обр}$ много меньше потерь в конденсаторе C_x; с целью получения совпадения по фазе напряжений на C_x и $C_{обр}$ конденсатор $C_{обр}$ шунтируют сопротивлением *5* (порядка 2 *мгом*). На вертикальные отклоняющие пластины *В* осциллографа подается напряжение $U_{обр}$, снимаемое с конденсатора $C_{обр}$, пропорциональное его заряду, а также заряду на конденсаторе C_x, поскольку заряды последовательно включенных конденсаторов C_x и $C_{обр}$ одинаковы. На горизонтальные отклоняющие пластины *Г* осциллографа подается напряжение U_x, снимаемое с сопротивления r_2 делителя напряжения *3* (фиг. 113), пропорциональное напряжению на конденсаторе C_x, поскольку к нему практически приложено все напряжение U, подводимое к схеме. Напряжение U отсчитывают по вольтметру V_1. Делитель напряжения может быть выполнен в виде двух образцовых безреактивных сопротивлений r_1 и r_2. Для подбора сопротивлений r_1 и r_2 делителя служит вспомогательный вольтметр V_2. Конденсатор $C_{обр}$ обычно представляет магазин образцовых слюдяных конденсаторов. Соединительные провода и зажимы должны быть экранированы, а экраны заземлены. Напряжение к отклоняющим пластинам может быть подведено непосредственно или через усилители горизонтального и вертикального отклонений. После прогрева ламп и фокусировки луча в случае использования усилителей производят предварительную установку горизонтального и вертикального усиления.

Для этой цели, не присоединяя испытуемый конденсатор к зажимам C_x, замыкают накоротко зажимы вертикального усиления осциллографа; включают напряжение ключом K, устанавливают с помощью автотрансформатора нужное значение напряжения U_x по показаниям вольтметра V_1 и рукояткой горизонтального усиления разворачивают луч в горизонтальную прямую длиною L_0; в дальнейшем не меняют усиления в процессе измерений. Горизонтальный масштаб напряжений осциллограммы

$$m_u = \frac{2\sqrt{2}\,U}{L_0}, \tag{166}$$

где U—напряжение, измеренное вольтметром V_1.

Для установки вертикального усиления замыкают накоротко вход горизонтального усиления, к зажимам C_x присоединяют градуировочный конденсатор $C_{гр}$, емкость которого известна; емкость $C_{гр}$ должна быть близка к емкости испытуемого кон-

денсатора. Включив питание, разворачивают рукояткой вертикального усиления луч в вертикальную прямую длиной H_0; в дальнейшем не меняют вертикального усиления. Вертикальный масштаб заряда

$$m_q = \frac{2\sqrt{2}\,C_{гр}U}{H_0}; \qquad (167)$$

напряжение $U_{обр}$ находят из соотношения

$$U_{обр} = U\frac{C_{гр}}{C_{обр}}, \qquad (168)$$

где U—напряжение, вторично измеренное вольтметром V_1.

Для получения осциллограммы диэлектрического гистерезиса присоединяют к зажимам C_x вместо конденсатора $C_{гр}$— испытуемый и, включив вертикальный и горизонтальный входы осциллографа, замыкают ключ K и получают на экране изображение кривой гистерезиса, которое фотографируют. Можно определить вертикальный и горизонтальный масштабы непосредственно по осциллограмме, не пользуясь градуировочным конденсатором; напряжение U на конденсаторе C_x определяют при помощи вольтметра V_1, а напряжение $U_{обр}$ на зажимах конденсатора $C_{обр}$ измеряют ламповым или электростатическим вольтметром $U_л$; включение этого вольтметра на схеме фиг. 113, *а* показано пунктиром. Для измерения напряжения на конденсаторе $C_{обр}$ может быть использован ламповый вольтметр типа ЛВ-9, имеющий пределы измеряемых напряжений от 3 *мв* до 300 *в* в диапазоне частот от 50 *гц* до 50 *кгц*. Входная емкость прибора не превосходит 100 *пф*, активная составляющая входного сопротивления—150 *ком*. Погрешность прибора при частоте 1000 *гц* составляет ± 2,5%, причем она может возрасти при колебаниях напряжения сети, смене ламп и т. п.

Масштаб зарядов

$$m_q = \frac{2\sqrt{2}\,U_{обр}C_{обр}}{H}. \qquad (169)$$

Масштаб напряжений

$$m_u = \frac{2\sqrt{2}\,U}{L}, \qquad (170)$$

где L и H—расстояния по горизонтали и вертикали между вершинами гистерезисной кривой (фиг. 113, *б*). Последний способ определения масштабов значительно удобнее, так как он дает возможность изменять величину усиления по вертикали и горизонтали непосредственно при осциллографировании, наблюдая за изображением кривой гистерезиса на экране.

По осциллограмме определяют ряд величин, характеризующих сегнетоконденсатор. Эффективная емкость

$$C_э = \frac{Q_m}{U_m} = \frac{m_q \cdot H}{m_u L}. \qquad (171)$$

Дифференциальная емкость определяется мгновенными значениями заряда и напряжения, найденными по осциллограмме; она пропорциональна тангенсу угла δ наклона касательной к оси напряжений

$$C_д = \frac{m_q}{m_u} \operatorname{tg} \delta. \qquad (172)$$

Во многих случаях возможно пользоваться идеальной кривой гистерезисного цикла (фиг. 5), не учитывающей потери, и по ней определять дифференциальную емкость как функцию напряжений u. Пользуясь зависимостью дифференциальной емкости от мгновенного значения напряжения находят зависимость дифференциальной нелинейности

$$N_д = \frac{1}{C_д} \frac{dC_д}{du}$$

от мгновенного значения напряжения (фиг. 8, *б*). По осциллограмме гистерезиса находят также нелинейность насыщения

$$N_к = \frac{1}{U_m} \frac{C_{о.д}}{C_{m.д}},$$

где значения дифференциальной емкости $C_{о.д}$—при заряде $q=0$ и $C_{m.д}$—при $q=Q_m$.

Активная мощность (гистерезисные потери) P_a конденсатора пропорциональна площади $S_г$ петли гистерезиса:

$$P_a = f \oint u\,dq.$$

Измерив эту площадь $S_г$, находят

$$P_a = f m_q m_u S_г. \qquad (173)$$

Тангенс угла гистерезисных потерь сегнетоконденсатора находят по значениям $S_г$, H и L:

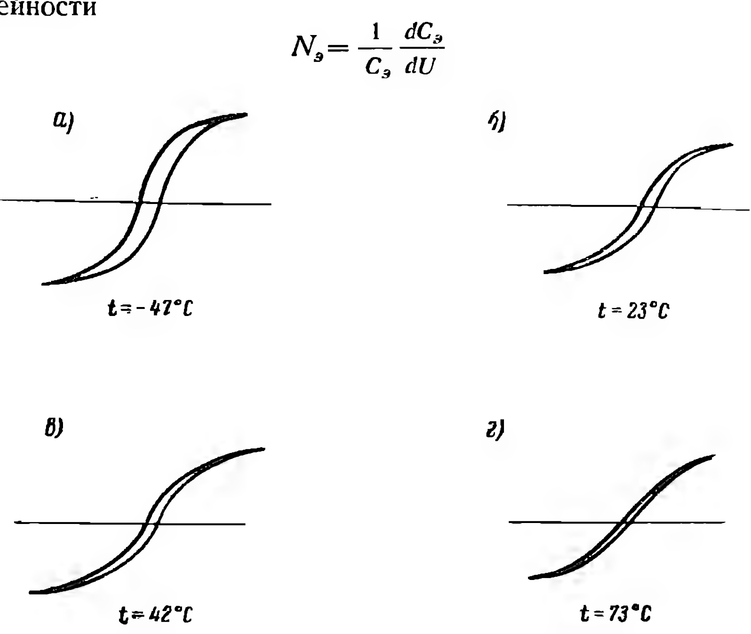
$$\operatorname{tg} \delta_э = \frac{f \oint u\,dq}{2\pi f \frac{Q_m U_m}{2}} = \frac{4S_г}{\pi H L}. \qquad (174)$$

Добротность сегнетоконденсатора

$$Q_э = \frac{\pi H L}{4S_г}. \qquad (175)$$

Снимая ряд осциллограмм гистерезиса для предварительно деполяризованного конденсатора при возрастающих амплитудах напряжения и соединяя вершины кривых, строят основную кулонвольтную кривую конденсатора. Определив из каждой осциллограммы эффективную емкость, строят зависимость этой емкости от напряжения и зависимость эффективной нелинейности

$$N_э = \frac{1}{C_э} \frac{dC_э}{dU}$$



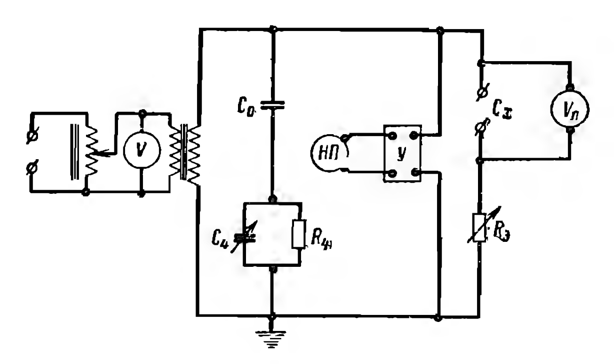
Фиг. 114. Осциллограммы гистерезиса для одного из видов сегнетокерамики; $f=400$ *гц*; $E=4{,}2$ *кв/см*; *а*) $t=-47°$ C; *б*) $t=23°$ C; *в*) $t=42°$ C; *г*) $t=73°$ C

от действующего значения напряжения. Осциллограммы гистерезиса снимают часто при различных температурах (фиг. 114), для чего используют камеру тепла и холода.

Мостовые измерения производят при помощи мостовых схем, предназначенных для определения емкости конденсатора и его потерь (фиг. 115). Однако полностью уравновесить мост не удается, так как включение нелинейного конденсатора в цепь сопровождается появлением высших гармоник в кривых тока. Напряжение в диагонали моста, содержащего в одном из плеч нелинейную емкость, не удается снизить до нуля; это напряжение тем больше, чем ниже коэффициент искажения кривой, т. е. отношение действующего значения основной гармоники к действующему значению всей кривой.

Существенное значение имеет величина напряжения, от которого зависит эффективная емкость конденсатора и его $\operatorname{tg} \delta_э$,

определяемые при помощи мостовой схемы. Поэтому необходимо устанавливать при измерениях напряжение, соответствующее техническим условиям; напряжение измеряют ламповым или электростатическим вольтметром, присоединяемым параллельно испытуемому конденсатору. Усилитель, включаемый обычно в диагонали перед нулевым прибором, должен быть настроен на основную частоту. Заметим, что измерение емкости и добротности сегнетоконденсатора следует производить примерно через минуту после включения напряжения, так как вначале показания приборов носят неустойчивый характер. Измерение емкости и добротности при слабых



Фиг. 115. Принципиальная схема моста с параллельным включением C_4 и R_4 типа МДП

$V_л$—ламповый вольтметр; *У*—усилитель; *НП*—нулевой прибор

переменных полях может быть выполнено при помощи специального моста для сегнетоконденсаторов, типа МСК, разработанного А. А. Архангельской и Н. А. Багровым. Мост питается от внутреннего генератора звуковой частоты (1000 *гц*). Диапазон измеряемых емкостей от 250 до 84 000 *пф*; добротность сегнетоконденсатора может быть определена в пределах от 2 до 1000 ($\operatorname{tg}\delta = 0{,}5 \ldots 0{,}001$). После уравновешивания моста значения $C_э$ и $\operatorname{tg}\delta_э$ непосредственно отсчитываются по шкалам. Особенность этого прибора заключается в том, что напряжение на испытуемых конденсаторах практически почти не изменяется ни в процессе уравновешивания моста, ни при замене одного испытуемого конденсатора другим в каждом диапазоне; это обстоятельство существенно, так как величина емкости сегнетоконденсатора зависит от напряжения. Для различных диапазонов емкости амплитуда переменного напряжения имеет следующие значения:

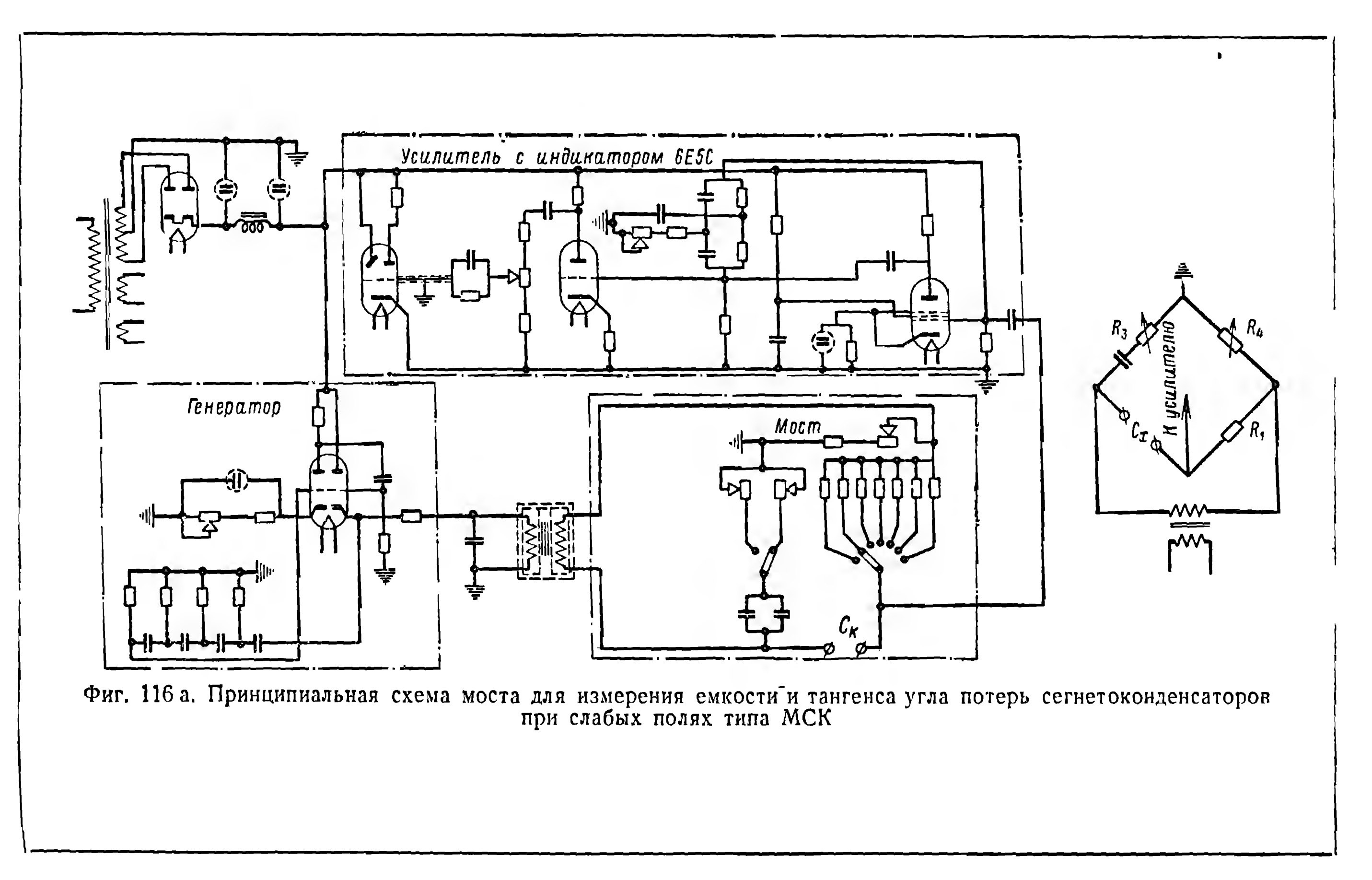
при емкости от	250 до	10 000 *пф*	напряжение	$U_m = 15 \pm 1$ *в*;
„ „ „	10 000 „	30 000 „	„	$U_m = 13 \pm 2$ *в*;
„ „ „	30 000 „	80 000 „	„	$U_m = 9 \pm 2$ *в*.

Другая особенность установки заключается в удачном выборе нулевого прибора, служащего индикатором равновесия моста; в качестве индикатора использована лампа „магический глаз“, включенная через усилитель. Как уже указывалось, вследствие появления высших гармоник уравновесить мост переменного тока, в случае испытаний сегнетоконденсатора, удается лишь на основной частоте; при этом некомпенсированные составляющие напряжений высших гармоник в измерительной диагонали вызывают отклонение нулевого прибора. Использование в качестве индикатора равновесия лампы „магический глаз“ при этих условиях упрощает уравновешивание моста. Мост рассчитан для измерений в семи диапазонах емкости, причем с помощью переключателя изменяется множитель M лимба „емкость“ в пределах от $M=1$ до $M=100$. Каждый диапазон предназначен для определенного типа сегнетоконденсаторов.

Диапазон I ($C_э=250 \ldots 840$ *пф*, $M=1$)—для опрессованных боченочных конденсаторов.

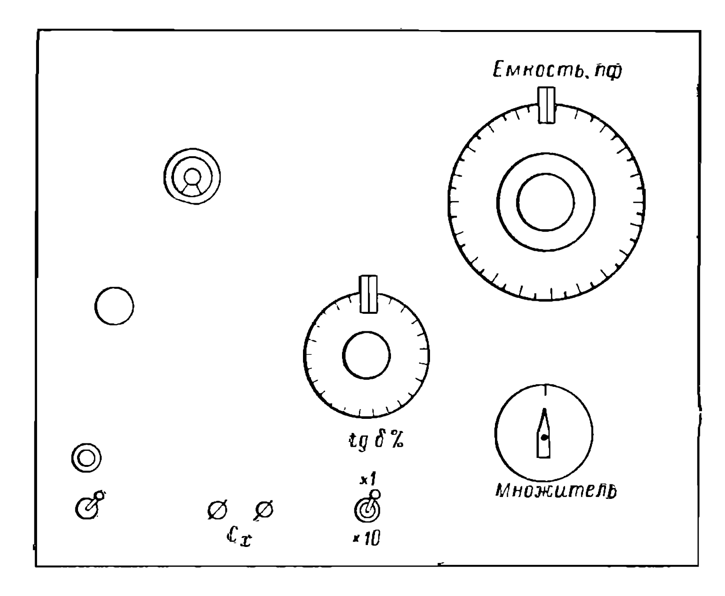
Диапазон II ($C_э=500 \ldots 1680$ *пф*, $M=2$)—для трубчатых конденсаторов.

Остальные диапазоны—для конденсаторов блочного типа бóльшей емкости; эти диапазоны рассчитаны для измерения следующих емкостей: III от 1000 до 3360 ($M=4$); IV—от 2500 до 4000 *пф* ($M=10$); V от 5000 до 16 800 *пф* ($M=20$); VI от 10 000 до 33 600 ($M=40$) и VII—от 25 000 до 84 000 ($M=100$). В основу прибора положен равновесный мост переменного тока (фиг. 116). Уравновешивание по фазе производят изменением сопротивления R_8, уравновешивание по модулю напряжения—изменением сопротивления R_4. Мост питается от сети 220 *в*, причем колебания напряжения сети в пределах $\pm$ 15% не сказываются на результатах измерения, так как прибор снабжен внутренним стабилизатором напряжения. От генератора звуковой частоты напряжение через экранированный трансформатор подводится к вершинам, расположенным на одной диагонали моста. Напряжение с другой диагонали подается на усилитель. Для уменьшения помех в схему включен фильтр RC. С помощью описанного моста не представляется возможным измерять емкость конденсатора, если один из выводов конденсатора соединен с землей. Сигнал с выхода усилителя подается на сетку лампы 6Е5С („магический глаз“), работающей в режиме сеточного детектирования. Равновесию моста соответствует наибольший раствор темного сектора лампы. На передней панели моста расположены переключатель диапазонов емкости „множитель C“ и рукоятка с лимбом „емкость“, тумблер „tg δ“ („× 1“, „× 10“) и рукоятка с лимбом „tg δ“, окно для наблюдения за экраном лампы „магический глаз“, регулятор чувствительности, зажимы для включения испытуемого конденсатора, выключатель сети и индикаторная лампа.



Фиг. 116 а. Принципиальная схема моста для измерения емкости и тангенса угла потерь сегнетоконденсаторов при слабых полях типа МСК

После включения питания и прогрева в течение 10 минут присоединяют испытуемый конденсатор и ставят переключатель „множитель C“ и тумблер „$\operatorname{tg} \delta$“ в положения, отвечающие ожидаемым значениям емкости и тангенса угла потерь сегнетоконденсатора. Установив регулятор чувствительности в положение слабой чувствительности, вращают вначале лимб „емкость“, а затем лимб „$\operatorname{tg} \delta$“, добиваясь максимального раствора темного сектора лампы. Увеличив чувствительность



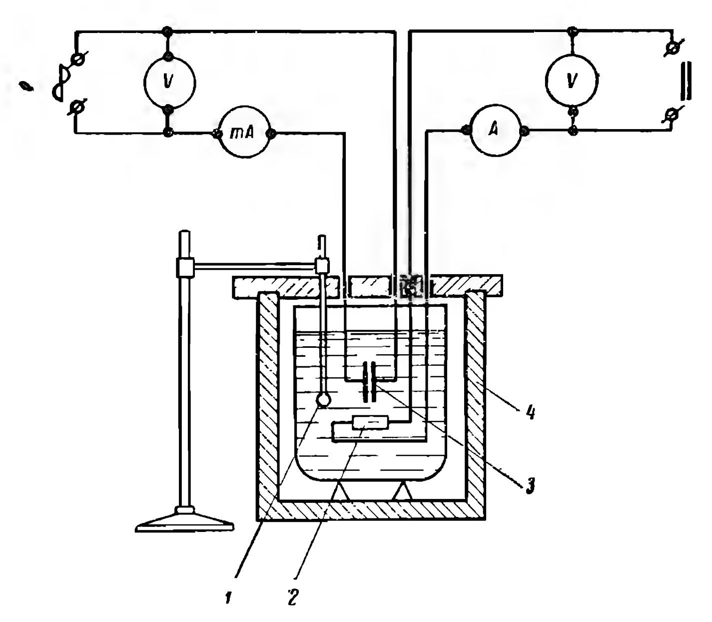
Фиг. 116 б. Передняя панель моста типа МСК

повторяют процесс уравновешивания моста; измерения заканчивают при максимальной чувствительности. После этого производят отсчет показаний по лимбам и умножают эти показания на соответствующие множители. Погрешность измерения емкости не превосходит $\pm 2\%$, а измерения тангенса угла потерь — $\pm (0{,}05 \operatorname{tg} \delta + 0{,}001)$.

Резонансные методы основаны на определении емкости и добротности контура, дважды настраиваемого в резонанс: один раз без испытуемого конденсатора, второй раз с включенным испытуемым конденсатором. К приборам, использующим явление резонанса, относится куметр и другие приборы [Л. 80].

С помощью куметра *КВ1* может быть измерена емкость и добротность конденсаторов при частотах от 50 *кгц* до 40 *мггц*. Погрешность измерения добротности линейных конденсаторов при частотах до 30 *мггц* составляет 5%, погрешность измерения емкости около 10%. При испытаниях сегнетоконденсаторов

погрешность может быть несколько больше. Для испытаний конденсаторов при частотах 30 ... 200 *мггц* может быть использован куметр *УК1*. Погрешность измерения добротности ($Q=100 \ldots 300$) при частотах до 100 *мггц* около 10%. Как правило, возможность изменения напряжения на испытуемом конденсаторе в этих приборах не предусмотрена, поэтому параметры измеряются при напряжении, обычно более низком, чем



Фиг. 117. Принципиальная схема для измерения активной и кажущейся мощности сегнетоконденсатора

1—калориметрический термометр или термопара; *2*—нагревательный элемент для тарирования калориметра; *3*—испытуемый конденсатор; *4*—калориметр

номинальное напряжение сегнетоконденсатора. В связи с этим и эффективная емкость конденсатора, зависящая от приложенного напряжения, может заметно отличаться от номинальной. Для получения номинального напряжения на испытуемом конденсаторе необходимо пользоваться автономным генератором высокой частоты с регулируемым напряжением на выходе; напряжение на испытуемом конденсаторе следует измерять ламповым вольтметром.

Метод амперметра—вольтметра условно охватывает определение кажущейся мощности S сегнетоконденсатора и его активной мощности (потерь) P_a. Первая измеряется с помощью вольтметра и миллиамперметра (фиг. 117):

$$S = UI.$$

Мощность P_a может быть определена с помощью калориметра. Для измерения активной мощности удобно пользоваться тарированным калориметром—т. е. калориметром, для которого предварительно определены зависимости приращения температуры от выделяемой активной мощности при различной длительности включения с учетом теплоемкости конденсатора, Тогда, включив конденсатор, определяют превышение температуры и по этой величине находят потери P_a.

Для измерения активной мощности (потерь) сегнетоконденсаторов может быть также использован электростатический ваттметр или ламповый ваттметр, который, однако, во время работы требует частой поверки; аналогичное применение эти приборы находят при исследовании ферромагнитных материалов. Электростатический ваттметр, изготовленный лабораторией ТВН Ленинградского Электротехнического института имени В. И. Ульянова (Ленина) позволяет измерить активную мощность, начиная от 10^{-3} *вт*; погрешность измерений (при коэффициенте потерь свыше 0,1) не превышает $\pm 3\%$ в диапазоне частот от 50 до $2 \cdot 10^4$ *гц*. Использование ваттметра требует включения последовательно с объектом исследования образцового безреактивного сопротивления известной величины. Это сопротивление должно быть мало по сравнению с сопротивлением сегнетоконденсатора на основной частоте.

При несинусоидальной форме кривых возможность пользования векторными диаграммами исключается. Однако рассматривая активную P_a и полную S мощности сегнетоконденсатора как катет и гипотенузу треугольника мощностей, находят эффективную емкость сегнетоконденсатора

$$C_э = \frac{\sqrt{S^2 - P_a^2}}{\omega U^2}$$

и его добротность

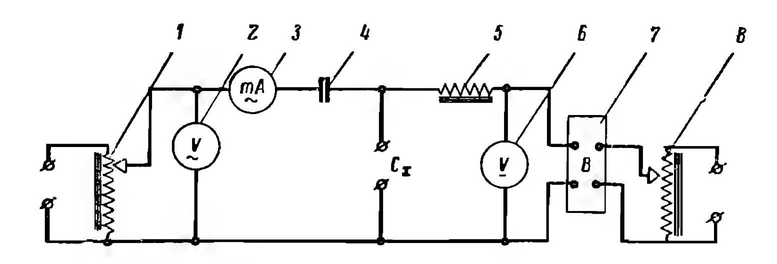
$$Q_э = \frac{\sqrt{S^2 - P_a^2}}{S}.$$

Приближенное измерение емкости и добротности сегнетоконденсаторов может быть произведено также с помощью других приборов, в частности, приборов с прямым отсчетом [Л. 84], позволяющих измерять отдельно емкость и тангенс угла потерь. Отсчет следует производить примерно через минуту после включения сегнетоконденсатора. В этих приборах обычно на испытуемом конденсаторе напряжение не постоянно и его регулировка не предусмотрена; необходимо при испытаниях это напряжение контролировать с помощью электростатического или лампового вольтметра. При использовании различных типов измерительных установок емкость (а также $\operatorname{tg} \delta$)

испытуемого конденсатора может оказаться различной, как ввиду неодинаковых напряжений, так и из-за различий в принципах, положенных в основу методики измерения.

48. Емкость конденсатора при переменном и постоянном напряжениях

Емкость конденсатора при переменном напряжении, на которое наложено более сильное постоянное напряжение, представляет собой реверсивную емкость. Ввиду невысоких переменных напряжений и малых потерь при этом, переменный ток



Фиг. 118. Схема для измерения реверсивной емкости с помощью миллиамперметра и вольтметра

1 — регулировочный автотрансформатор на стороне переменного тока; *2* — вольтметр переменного тока; *3* — миллиамперметр переменного тока; *4* — блокировочный конденсатор; *5* — дроссель; *6* — вольтметр постоянного тока; *7* — выпрямитель; *8* — регулировочный автотрансформатор на стороне постоянного тока

протекающий через сегнетоконденсатор, иногда приравнивают с приближением емкостной составляющей тока

$$I \approx U\omega C_э.$$

Исходя из этого, реверсивную емкость по показаниям приборов, установленных на стороне переменного тока, находят накладывая на переменное напряжение постоянную составляющую (фиг. 118). Конденсатор *4* является блокировочным, его емкость выбирается гораздо больше емкости испытуемого конденсатора. Дроссель *5* служит для запирания переменного тока в цепи постоянного тока. Вместо дросселя может быть включено сопротивление порядка 1 ... 2 *мгом.*

Реверсивная емкость

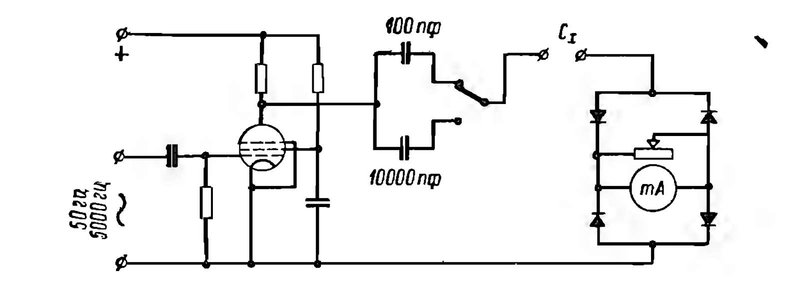
$$C_p \quad \frac{I}{2\pi f U}, \tag{176}$$

где U—показания вольтметра переменного тока.

Емкость C_p находят для различных значений постоянной составляющей напряжения, которую измеряют вольтметром *6*.

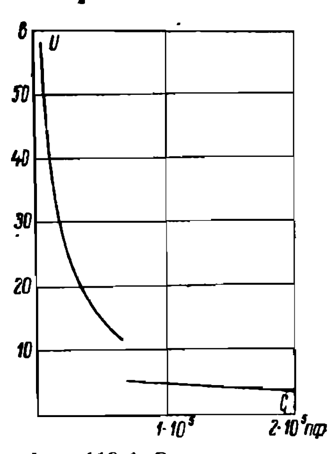
Более точные результаты можно получить, если емкость на

стороне переменного тока измерять резонансно-мостовыми методами или специальным прибором. К числу таких приборов с прямым отсчетом емкости относится прибор НИЕ-1 (фиг. 119а); погрешность измерений емкости на первом и втором диапа-



Фиг. 119 а. Принципиальная схема прибора НИЕ-1 для измерения емкостей до 0,01 *мкф*

зонах на средней части шкалы (от 50 до 200 делений) не превосходит ± 5%. Измерение на первом диапазоне производится при частоте 5000 *гц* в пределах емкостей от 10 до 1000 *пф*; на втором диапазоне—при частоте 50 *гц* в пределах от 1000 *пф* до 0,01 *мкф*. Прибор имеет также 3-й, 4-й и 5-й диапазоны, на которых может быть измерена емкость от 0,1 до 100 *мкф*. При определении емкости на первых двух диапазонах испытуемый конденсатор включается последовательно с образцовым конденсатором. К цепи подводится переменное напряжение, частота и амплитуда которого поддерживаются неизменными. Ток в цепи измеряется детекторным миллиамперметром; шкала его градуирована в единицах емкости. Перед началом измерений, не присоединив испытуемый конденсатор к зажимам, устанавливают стрелку прибора на ∞; при этом зажимы должны быть замкнуты накоротко, что осуществляется автоматически, когда в отверстия зажимов не вставлены отводы от конденсаторов.



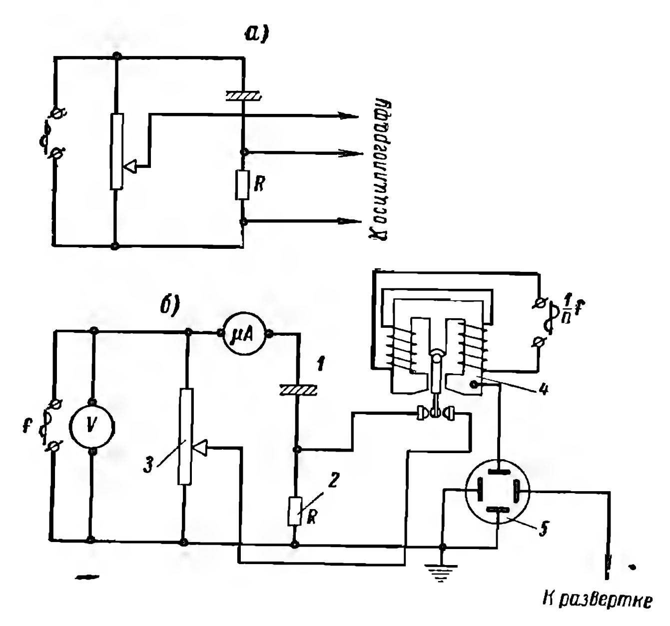
Фиг. 119 б. Зависимость напряжения на испытуемом конденсаторе от его емкости в приборе НИЕ-1

Напряжение переменного тока на испытуемом конденсаторе хотя и зависит от его емкости (фиг. 119 б), но составляет небольшую величину порядка 30 . . . 40 *в*. Это обстоятельство следует учитывать при оценке результатов измерений. Если

необходимо измерять реверсивную емкость при более низком переменном напряжении, следует воспользоваться мостом МСК, обеспечивающим почти неизменное напряжение порядка 12 *в*.

49. Кривые тока и напряжения конденсатора

При синусоидальном напряжении, проложенном к сегнетоконденсатору, кривая тока отличается от синусоиды, особенно при сильных полях и температурах, близких к $t_к$. Кривая тока



Фиг. 120. Схемы для осциллографирования тока и напряжения сегнетоконденсатора: *а* — с помощью двухлучевого катодного осциллографа; *б* — с помощью однолучевого осциллографа и поляризованного реле

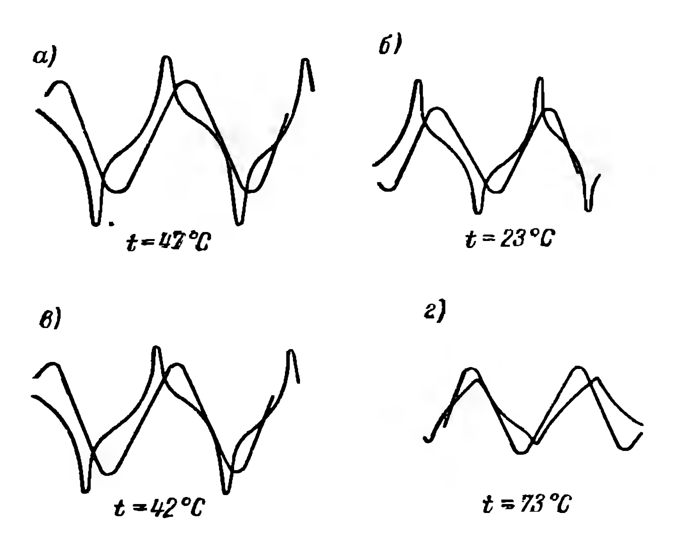
1 — испытуемый сегнетоконденсатор; 2 — безреактивное сопротивление; 3 — делитель напряжения; 4 — поляризованное реле; 5 — осциллограф

может быть построена по осциллограмме диэлектрического гистерезиса или же получена на экране электронно-лучевой трубки осциллографа. Обычно представляют интерес как кривая тока, так и кривая напряжения; одновременно их можно наблюдать на экране двухлучевого осциллографа. Кривая напряжения, снимаемого с безреактивного сопротивления (фиг. 120), воспроизводит кривую тока в цепи. Сопротивление R должно быть значительно меньше (примерно в 100 раз) величины $\frac{1}{2\pi f C_э}$.

Возможно использование и однолучевого осциллографа.

Для одновременного наблюдения на экране однолучевого осциллографа кривых тока и напряжения на конденсаторе применяют электронный коммутатор или же схема должна быть снабжена поляризованным реле *ПР*, обмотка которого питается переменным током пониженной частоты.

Если частота напряжения, подводимого к схеме,—f_1, то частота тока в обмотке реле должна составлять $\frac{f}{n}$, где $n=$



Фиг. 121. Осциллограммы напряжения и тока сегнетоконденсатора; в кривой тока выражены высшие гармоники: *а*) $t=-47°$ C; *б*) $t=23°$ C; *в*) $t=42°$ C; *г*) $t=73°$ C

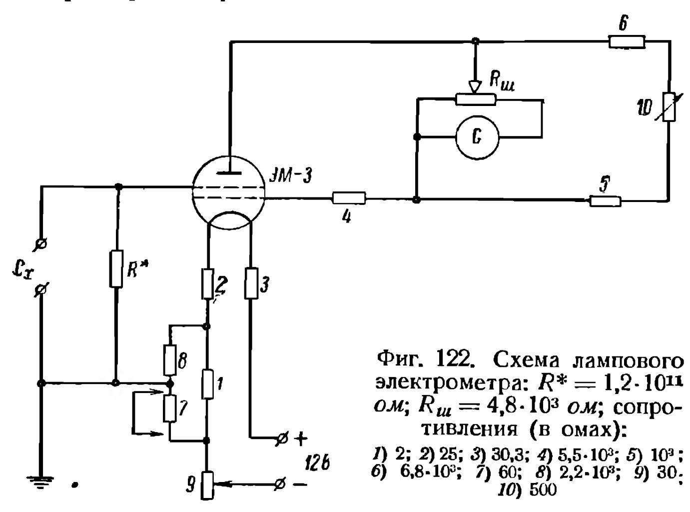
$=8\ ...\ 10$. Благодаря переключению контактов реле к вертикальным отклоняющим пластинам подводится попеременно либо напряжение, пропорциональное напряжению на сегнетоконденсаторе, либо напряжение, снимаемое с зажимов безреактивного сопротивления R_1, включенного последовательно с конденсатором; это напряжение пропорционально току; величину тока регулируют также микроамперметром. При достаточном насыщении керамики кривая тока заметно отличается от синусоиды (фиг. 121).

50. Пьезоэлектрические характеристики конденсатора

Плоский сегнетоконденсатор, предварительно поляризованный в сильном постоянном поле в течение определенного времени, приобретает пьезоэлектрические свойства.

Образцы для определения пьезомодуля могут иметь форму

дисков или прямоугольных пластинок. Перед нанесением электродов из вожженного серебра поверхности образца шлифуют. Образец с нанесенными электродами промывают спиртом и прогревают при 300° С, после чего поляризуют в постоянном поле с градиентом около 20 *кв/см*; могут быть использованы и более низкие градиенты, но тогда поляризацию ведут при температуре, близкой к точке Кюри, и охлаждают образец, не выключая напряжения. Определение пьезомодулей желательно производить примерно через 7 дней.



Фиг. 122. Схема лампового электрометра: $R^* = 1{,}2 \cdot 10^{11}$ *ом*; $R_ш = 4{,}8 \cdot 10^3$ *ом*; сопротивления (в омах):
1) 2; *2*) 25; *3*) 30,3; *4*) $5{,}5 \cdot 10^3$; *5*) 10^3; *6*) $6{,}8 \cdot 10^3$; *7*) 60; *8*) $2{,}2 \cdot 10^3$; *9*) 30; *10*) 500

Статический пьезомодуль d_{33} может быть найден, исходя из соотношения (64)

$$-P_z = d_{33}\sigma_{zz},$$

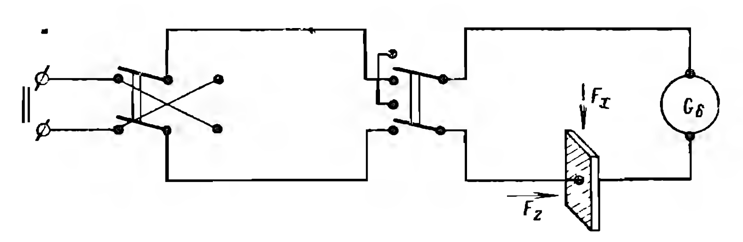
где

σ_{zz}—механическое напряжение вдоль оси z;
P_z—поляризованность.

Если к плоскому образцу приложить сжимающее усилие F_z вдоль оси z, т. е. вдоль направления предшествующей поляризации постоянным полем, то на гранях образца, перпендикулярных оси z, появится заряд, который может быть измерен электрометром или баллистическим гальванометром. Последний способ отличается большей простотой, однако требует, чтобы утечки в образце и в самой схеме баллистического гальванометра были бы малы. Величина измеряемого заряда может меняться от $10^{-8}k$ до $10^{-6}k$ и больше; в связи с этим приходится в процессе измерений подбирать нужную постоянную гальванометра; ее изменение достигается включением шунтирующего сопротивления. Градуировку следует производить для каждого сопротивления отдельно.

При наличии электрометра его используют для измерения напряжения, возникающего на пьезоэлементе под действием механической нагрузки. Умножая это напряжение на емкость пьезоэлемента, находят появившийся на его гранях заряд; емкость измеряют после подготовительной поляризации обычно мостовым методом.

Широкое распространение получили ламповые электрометры. Схема одного выполненного электрометра представлена на фиг. 122. В анодную и экранную цепи лампы ЭМЗ включают по мостовой схеме гальванометр М-21; плечи моста подбирают



Фиг. 123. Принципиальная схема для определения пьезоэлектрических модулей в статическом режиме

так, чтобы при отсутствии напряжения на образце гальванометр не давал отклонений. Для градуировки на вход лампы подают небольшое напряжение через делитель R_7, R_8; постоянная электрометра может составлять величину порядка 10^{-5} *в/мм*.

Прикладывая усилие к посеребренным поверхностям образца, т. е. вдоль оси z, производят, например, с помощью баллистического гальванометра измерение заряда, возникающего благодаря пьезоэффекту (фиг. 123). Поляризованность P_z численно равна поверхностной плотности заряда, появившегося на электроде

$$P_z = \frac{Q}{S}, \tag{177}$$

где S—площадь электрода, равная площади поверхности образца (фиг. 124).

Сжимающее напряжение σ_{zz} равно нормальному усилию F_z, отнесенному к единице площади

$$\sigma_{zz} = \frac{F_z}{S}. \tag{178}$$

Поэтому пьезомодуль d_{33} может быть определен из выражения

$$d_{33} = \frac{C_D a}{F_z} \left[\frac{к}{кг}\right]. \tag{179}$$

В этом выражении: F_z—в *кг*, C_D—в *к/мм*, a—в *мм*.

Переход к другим единицам измерений можно осуществить по формуле (см. также параграф 5)

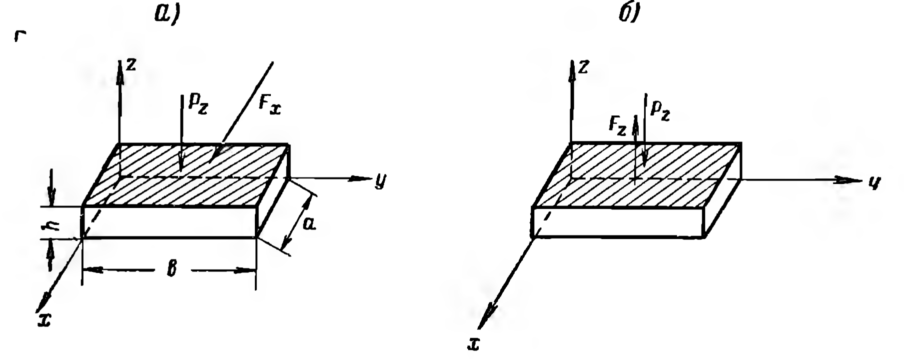
$$d_{33}\left[\frac{\text{кулон}}{\text{ньютон}}\right]=0{,}102 d_{33}\left[\frac{\text{кулон}}{\text{килограмм}}\right]$$

Продолжительность действия нагрузки на образец составляет при измерениях около 10 секунд.

Статический пьезомодуль d_{31} может быть найден из соотношения (62)

$$-P_z=d_{31}\sigma_{xx},$$

где σ_{xx}—механическое напряжение (сжатия или растяжения) вдоль оси x; P_z—поляризованность вдоль оси z. Для измере-



Фиг. 124. К расчету статического пьезомодуля при усилии, направленном: *а* — вдоль оси *x* и *б* — вдоль оси *z*

ния пьезомодуля d_{31} сжимающую нагрузку прикладывают к одному из торцов керамической пластинки, например, вдоль оси x (фиг. 124); нагрузка обозначена F_x.

Поляризованность образца

$$P_z=\frac{Q}{S}=\frac{Q}{ab}. \tag{180}$$

Механическое напряжение

$$\sigma_{xx}=\frac{F_x}{bh}. \tag{181}$$

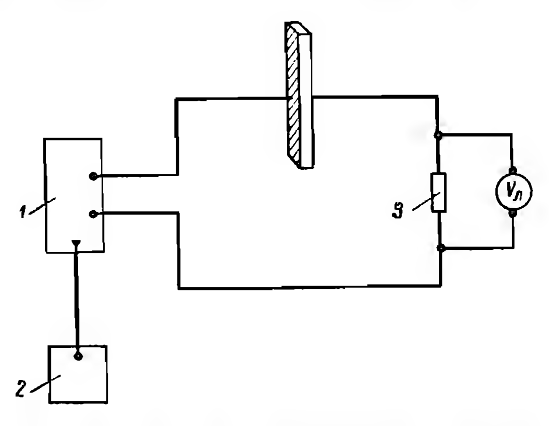
Пьезомодуль d_{31} выражается следующим образом:

$$d_{31}=\frac{C_D a\cdot h}{F_x a}, \tag{182}$$

где h—толщина образца керамики, а a—длина образца вдоль оси x.

Пьезомодуль d_{31} выражается в тех же единицах, что и модуль d_{33}.

Динамический пьезомодуль определяют, прикладывая к образцу переменное электрическое напряжение от источника с регулируемой частотой; при этом в образце возбуждаются механические колебания. При повышении частоты по мере ее приближения к собственной частоте колебаний образца амплитуда деформаций увеличивается, а ток в цепи возрастает. При совпадении частот, т. е. при резонансе—ток наибольший. По максимальному току можно, следовательно, определить



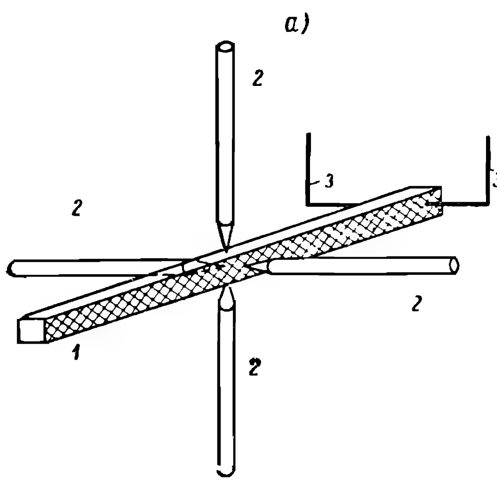
Фиг. 125. Одна из принципиальных схем для определения пьезоэлектрических модулей в динамическом режиме

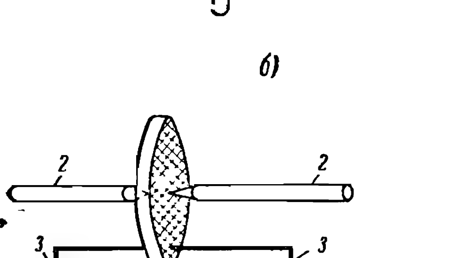
1 — генератор на 20—200 *кгц*; *2*—частотомер; *3*—образцовое сопротивление (100—3000 *ом*); $V_л$—ламповый вольтметр

частоту собственных колебаний образца. При дальнейшем повышении частоты в цепи ток падает и при некотором значении частоты приобретает минимальное значение; эта точка именуется точкой антирезонанса. Таким образом, частоту резонанса f_p и частоту антирезонанса $f_p + \Delta f$ находят по максимуму и минимуму тока в цепи, определяемому в условиях плавного изменения частоты питания. Ток обычно измеряют по величине падения напряжения на небольшом сопротивлении, включенном последовательно с образцом пьезоэлектрика (фиг. 125). Частоту резонанса и антирезонанса находят с точностью до 10 *гц*, для чего иногда используют метод сравнения с частотой кварцевого генератора.

Используют также генераторы с точным отсчетом частоты; напряжение, измеряемое ламповым вольтметром, имеет величину порядка 0,1 *в* и выше. Подводимое напряжение от генератора—порядка 2 *в* и более. В качестве образцов для измерения динамического модуля d_{13} используют либо бруски, либо диски из сегнетокерамики. Брусок (длиной 15—30 *мм*, сечением 3×3 или 4×4 *мм*) закрепляют в точках, являющихся

геометрическими центрами боковых граней бруска (фиг. 126); прикладывая к посеребренным граням переменное напряжение возбуждают в бруске продольные механические колебания Если используют диск (диаметром 25—30 *мм*, толщиной 3—4 *мм*), то его зажимают между двумя остриями, расположенными по центральной оси (фиг. 126, *б*); в этом случае в диске возбуждаются радиальные колебания.





Фиг. 126. Образцы для определения динамического пьезомодуля: *а* — образец в виде бруска, закрепленного с четырех сторон (d_{31}); *б* — образец в виде диска, закрепленного между двумя остриями в центре

1—керамика с нанесенными электродами; *2*—зажимы; *3*—подводящие провода

Найдя Δf — разность частот резонанса и антирезонанса, вычисляют значение пьезомодуля d_{13}.

Для бруска длиной l

$$d_{31}=3{,}33\cdot 10^{-5}\sqrt{\frac{\pi\Delta f\varepsilon_э}{64\gamma l^2 f_p^3}}\,; \tag{183}$$

для диска диаметром $2R$

$$d_{31}=3{,}33\cdot 10^{-5}\sqrt{\frac{\Delta f\varepsilon_э}{36\pi R^2\gamma f_p^3}}\,, \tag{184}$$

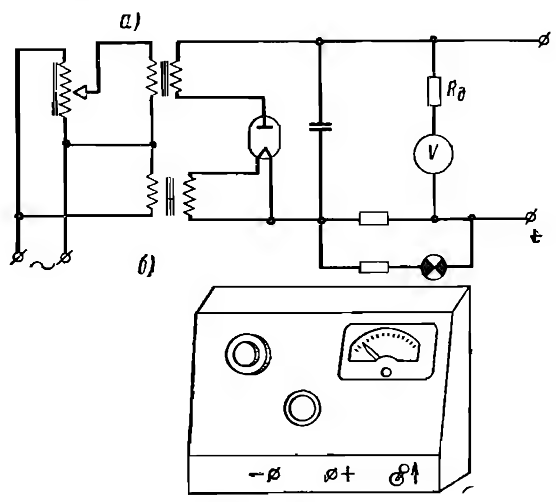
где γ—плотность сегнетокерамики, $\varepsilon_э$ — эффективная диэлектрическая проницаемость в условиях слабого поля при окружающей температуре; значение динамического пьезомодуля получают в кулонах на килограмм (*к/кг*).

В некоторых случаях частоты резонанса и антирезонанса находят при наложении постоянного поля. Напряжение от источника постоянного тока подводят к образцу через ограничительные сопротивления порядка 10^7 *ом*, а сегнетоконденсатор отделяют с двух сторон от остальной части схемы блокировочными конденсаторами емкостью порядка 0,1 *мкф*.

51. Электрическая прочность конденсатора

Испытание на электрическую прочность проводят при постоянном или при переменном токе. Испытательное напряжение устанавливают несколько выше номинального (глава четвер-

тая). Испытательные установки, в которых диэлектрик конденсатора проверяется на пробой, носит иногда название пробивных установок. Для испытания постоянным напряжением до 3 *кв* может быть использована установка типа ПУ2 (фиг. 127). Напряжение регулируется автотрансформатором, для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения включен конденсатор емкостью в несколько микрофарад. Напряжение измеряется магнитоэлектрическим прибором с добавочным сопро-

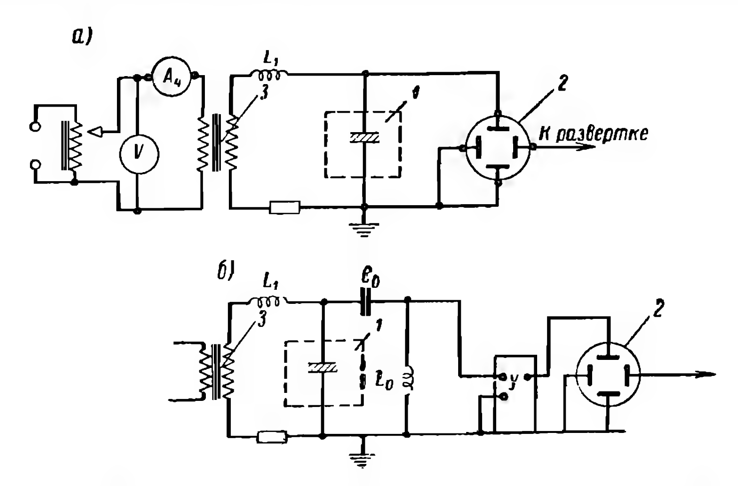


Фиг. 127. Пробойная установка типа ПУ2:
а — принципиальная схема; *б* — передняя панель

тивлением с погрешностью не более $\pm 5\%$. Параллельно ограничительному сопротивлению R_0 включена неоновая лампочка, которая вспыхивает при пробое конденсатора. Напряжение к выводам конденсатора подводится при помощи щупов с блокировкой; щупы соединяются с зажимами установки при помощи высоковольтного гибкого кабеля. Процесс испытания конденсаторов высоким напряжением может быть автоматизирован. Один из подобных полуавтоматов, разработанный А. А. Архангельской с сотрудниками, предназначен для испытания напряжением постоянного тока 18 *кв* опрессованных боченочных конденсаторов; длительность испытания каждого конденсатора составляет 10 сек. Если конденсатор пробивается, то под действием тока, протекающего при пробое, срабатывает реле и зажимные губки раскрываются, конденсатор выпадает в камеру брака. Основной частью прибора является высокочастотный генератор. Напряжение высокой частоты повышается при помощи трансформатора и выпрямляется выпрямителем, собранным по схеме удвоения. Благодаря использованию повышенной частоты уменьшаются пульса-

ции выпрямленного напряжения и снижаются габариты трансформатора. Выпрямленное напряжение подводится к пружинным контактам для испытания конденсатора. Величина постоянного напряжения может регулироваться изменением потенциала сетки усилительной лампы электронного стабилизатора установки. Производительность полуавтомата составляет 22 000 конденсаторов в смену.

Аналогичный полуавтомат разработан также для испытания высоким напряжением блочных конденсаторов низкого напря-



Фиг. 128. Схемы для испытания сегнетоконденсаторов повышенным напряжением: *а* — без делителя; *б* — с делителем; L_1 — катушка индуктивности порядка 5 *мгн*; *У* — усилитель *1* — испытуемый конденсатор; *2* — осциллограф; *3* — повысительный трансформатор

жения типа КПС. Испытательное напряжение постоянного тока составляет 500 *в*; погрешность установки напряжения ± 2,3%. Длительность испытания—10 сек. Производительность установки 22 000 шт. в смену.

Пробою обычно предшествует возникновение частичных разрядов. Одна из схем, служащая в качестве индикатора частичных разрядов, использует осциллограф для регистрации кривой напряжения на нелинейном конденсаторе (фиг. 128). Если конденсатор не пробит, на экране экспонируется синусоида; при появлении частичных разрядов на синусоиду накладываются высокочастотные колебания, носящие неустойчивый, перемежающийся характер; при пробое вместо синусоиды на экране появляется горизонтальная прямая. Кроме того, при пробое наблюдается бросок стрелки амперметра $A_ч$, играющего роль индикатора пробоя; при отсутствии пробоя этот амперметр не дает показаний. Индуктивность L_1 препятствует замыканию токов высокой частоты, возникающих при появлении частич-

ных разрядов, через распределенные емкости обмотки трансформатора. При высоких испытательных напряжениях приходится включать осциллограф через делитель напряжения.

На схеме (фиг. 128, *б*) показан резонансный делитель, отличающийся тем, что большая часть составляющей напряжения промышленной частоты ложится на конденсатор C_0; в интервале частот колебаний, вызванных частичными разрядами, наступает резонанс напряжений между C_0 и L_0, благодаря чему эти колебания легко обнаружить при помощи осциллографа. Имеются и другие схемы для обнаружения частичных разрядов. Заметим, что согласно проведенным исследованиям длительное воздействие повышенных напряжений понижает электрическую прочность сегнетокерамики; иными словами проверка имеющегося запаса электрической прочности вызывает его уменьшение. Отсюда следует, что испытательное напряжение должно прикладываться кратковременно. Повидимому, длительность массовых испытаний не должна превышать 5—10 сек.

При измерениях напряжения частичных разрядов, а также при измерениях пробивного напряжения на партии одинаковых образцов наблюдается разброс получаемых значений, несмотря на использование одних и тех же методов технологии и одной и той же керамической массы. При испытаниях стремятся создать одинаковые условия опыта—обеспечить одну и ту же толщину керамики, одни и те же размеры и форму электродов, неизменные значения частоты и скорости подъема напряжения и т. п. Несмотря на это, нередко напряжения пробоя или частичных разрядов для отдельных образцов могут отклоняться от средних значений на 30% и более. Вследствие этого для получения достоверных результатов, необходимых для оценки электрической прочности, не следует ограничиваться двумя-тремя образцами, а необходимо испытывать не менее 25 образцов. При решении вопросов конструкции и технологии производства, связанных с серийным выпуском конденсаторов, необходимо иметь в распоряжении данные испытаний более крупных партий.

Наибольшее значение при обработке результатов испытаний имеют функция распределения и интегральная кривая, получаемые обычно следующим образом. Пусть в результате измерения пробивного напряжения для партии, насчитывающей N образцов, оказалось, что наименьшее значение напряжения составляет $U_{мин}$, а наибольшее $U_{макс}$. Разность напряжений $U_{макс}-U_{мин}$ подразделяют на ряд одинаковых небольших интервалов; в примере, приведенном ниже, величина интервала—0,3 *кв*. Для интервала номер k находят среднее напряжение U_k и то количество образцов N_k, которое пробилось при напряжениях, лежащих в этом интервале (табл. 13). Для каждого интервала также находят, какую долю p_k от об-

щего количества N образцов составляет число N_k образцов, пробитых при напряжениях в интервале k:

$$p_k = \frac{N_k}{N}. \qquad (185)$$

Таблица 13

К определению функции распределения и интегральной кривой по данным испытания партии образцов

k	$U_{k\,мин}$ *кв*	$U_{k\,макс}$ *кв*	U_k *кв*	N_k *шт.*	p_k	p_kU_k *кв*	M_k %
1	3,2	3,5	3,35	1	0,04	0,134	4
2	3,6	3,9	3,75	2	0,08	0,300	12
3	4,0	4,3	4,15	2	0,08	0,332	20
4	4,4	4,7	4,55	4	0,16	0,728	36
5	4,8	5,1	4,95	6	0,24	1,190	60
6	5,2	5,5	5,35	5	0,20	1,070	84
7	5,6	5,9	5,75	3	0,12	0,690	92
8	6,0	6,3	6,15	1	0,04	0,246	96
9	6,4	6,7	6,55	1	0,04	0,262	100
	Всего:			25	$\Sigma p_k = 1$	$\Sigma p_kU_k = 4,95$ *кв*	

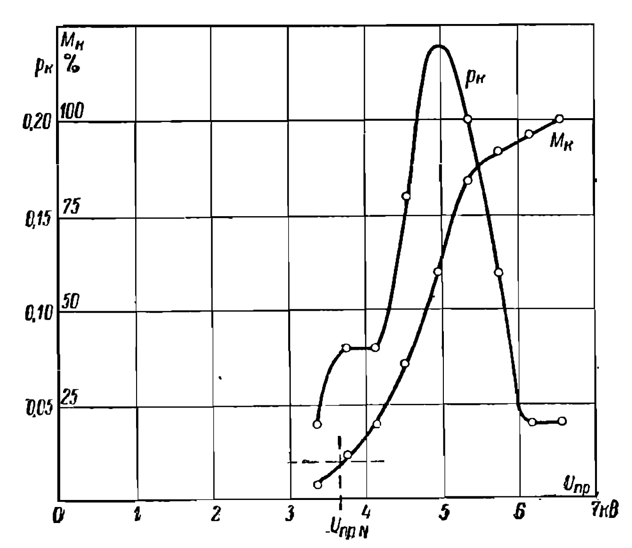
Откладывая по оси абсцисс напряжение $U_{пр}$, а по оси ординат—величину p_k, получают кривую, изображающую функцию распределения (фиг. 129). Она иллюстрирует характер разброса значений напряжения при испытании партии образцов. Если найти сумму

$$\sum_{k=1}^{k=n} p_k U_k = \overline{U}_{пр}, \qquad (186)$$

то она даст величину напряжения $\overline{U}_{пр}$, которое можно назвать средневзвешенным напряжением. В данном примере (табл. 13) $\overline{U} = 4{,}95$ *кв*.

Однако исходить из этой величины при выборе рабочего напряжения нельзя, так как для ряда образцов были получены более низкие напряжения пробоя. Для построения интегральной кривой подсчитывают, переходя от одного интервала к другому в сторону возрастающих напряжений, число образцов M_k (в процентах к общему количеству N), оказавшихся пробитыми при напряжении U_k (характеризующем данный интервал k) и при напряжениях более низких. Откладывая по оси ординат значения M_k, соответствующие напряжениям U_k, получают так называемую интегральную кривую (фиг. 129). С помощью интегральной кривой нетрудно определить некоторое наименьшее напряжение $U_{пр.\,н}$, удовлетворяющее следующему условию: при этом напряжении и при более низких

произойдет пробой M процентов общего количества образцов. Если, например, допустить возможность пробоя 10% образцов, то получим напряжение $U_{пр.\,п}=3{,}65$ *кв*. При определении рабочего напряжения исходят из величины $U_{пр.\,п}$, отвечающей вероятности пробоя 5 ... 10% общего числа образцов, выбирая разумный коэффициент запаса с учетом опыта эксплуатации, условий и срока службы и назначения конденсатора.



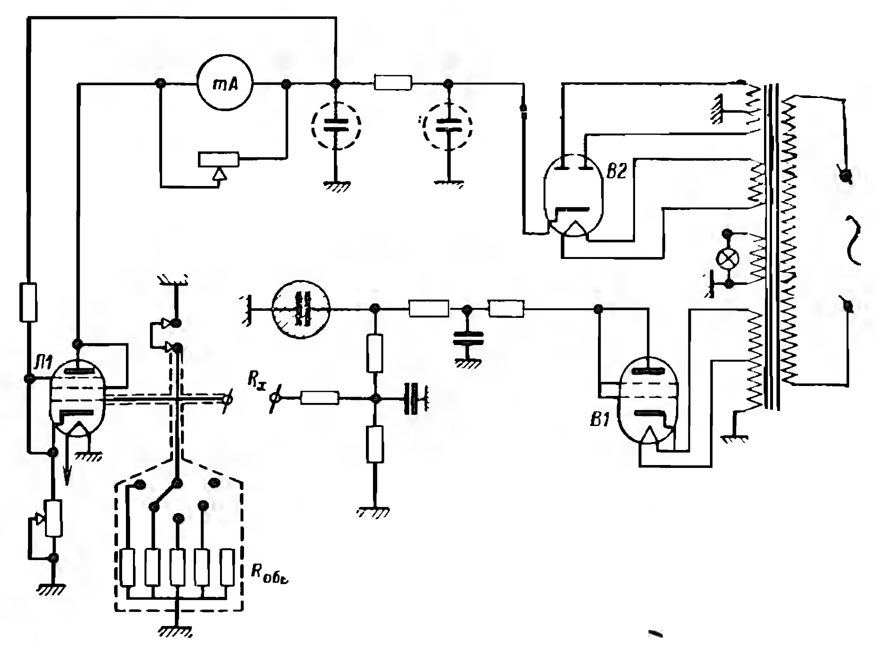
Фиг. 129. Функция распределения ($p_к$) и интегральная кривая ($M_к$), полученные в результате испытаний партии из 25 образцов

Для сравнения интересно определить число образцов, которое будет пробито при средневзвешенном напряжении $\bar{U}_{пр}$; в нашем примере при напряжении $\bar{U}_{пр}$ будет пробито 60% общего числа образцов.

52. Сопротивление изоляции конденсатора

Определение сопротивления изоляции нелинейных конденсаторов проводится с помощью тех же методов, которые применяются для измерения $R_{из}$ линейных конденсаторов. Необходимо, однако, иметь в виду, что воздействие постоянного напряжения вызывает появление остаточной поляризации и пьезоэлектрического эффекта; устранение этих остаточных явлений возможно путем тщательной деполяризации керамики. Измерение сопротивления изоляции выполняют при помощи гальванометра или лампового мегомметра; измерения производят при

постоянном токе [Л. 80]. Выбор испытательного напряжения для сегнетоконденсатора имеет важное значение; иногда допускают применение при испытаниях напряжения постоянного тока, близкого по величине к номинальному напряжению конденсатора. Нормы рекомендуют для измерений сопротивления изоляции линейных конденсаторов напряжение—100 *в*. Сопротивление изоляции сегнетоконденсатора заметно снижается



Фиг. 130. Принципиальная схема тераомметра ТО1

с повышением напряжения; этим объясняется необходимость проведения испытания при напряжении выше 100 *в*; часто измеряют объемное сопротивление сегнетокерамики при напряжении 500 *в*. Необходимо обеспечить отсутствие пульсаций напряжения источника питания. Показания отсчитываются через одну минуту после включения.

Измерение сопротивления изоляции конденсатора может быть выполнено при помощи лампового мегомметра, а также при помощи тераомметра типа ТО1, в котором величина сопротивления определяется по падению напряжения на образцовом сопротивлении $R_{обр}$ (фиг. 130), включенном последовательно с испытуемым; к этим сопротивлениям от лампового выпрямителя *В*1 подводится постоянное напряжение 100 *в*. Снимаемое с образцового сопротивления $R_{обр}$ напряжение подается на сетку лампы *Л*1; в анодной цепи этой лампы вклю-

чен миллиамперметр *mA*, проградуированный в значениях измеряемого сопротивления. С помощью четырех образцовых сопротивлений от 100 *ком* до 1000 *мгом* осуществляются измерения сопротивления изоляции в пределах от 10^6 до 10^{12} *ом*. Погрешность измерения в средней части шкалы не превосходит в первых трех диапазонах (множители шкалы 1, 10, 1000) 10%; в четвертом диапазоне (множитель 10 000)—20%. Заметим, что при включении конденсаторов с сопротивлением изоляции порядка 10^{10} *мгом* и выше стрелка прибора устанавливается медленно—примерно в течение 2 минут; поэтому измерение дает значение сопротивления изоляции более высокое, чем при отсчете по гальванометру через одну минуту.

Представляет интерес установка для измерения сопротивления изоляции типа ИСА, разработанная А. А. Архангельской с сотрудниками. Установка обеспечивает возможность измерения сопротивления изоляции в пределах от 10^6 до 10^{12} *ом*, причем длительность измерения не зависит от постоянной времени *Rc* конденсатора. Погрешность измерения не превосходит $\pm 20\%$.

53. Обратимая нестабильность и старение конденсатора

Свойства сегнетоконденсатора претерпевают изменения под влиянием климатических факторов, условий работы в электрической цепи и ремени. Эти изменения можно подразделить на обратимые и необратимые. В первом случае при известных условиях свойства конденсатора могут восстановиться и сделаться близкими к первоначальным. Необратимые изменения свойств представляют так называемое старение конденсатора и обычно развитие этого процесса в обратном направлении невозможно. К обратимым изменениям принадлежат изменения емкости и добротности под влиянием нагревания, причем возвращение к исходным значениям происходит с запаздыванием; процесс совершается продолжительное время после снижения температуры до первоначальной. Аналогичные изменения наблюдаются и после воздействия электрического поля, однако они имеют меньшую амплитуду и протекают значительно быстрее. Изменения емкости и добротности конденсатора также имеют место после его изготовления в условиях хранения при температуре ниже точки Кюри, когда после вжигания электродов из серебра и сборки происходит постепенное приближение емкости и добротности к установившимся величинам. Необходимость сравнения конденсаторов с точки зрения обратимых изменений заставляет искать критерий для оценки этих изменений. Если нагреть конденсатор до температуры t' ($t' < t_к$), то после охлаждения до исходной (нормальной) температуры t_0 эффективная емкость C_0' окажется выше первоначальной емкости C_0;

приращение $C_0'-C_0$ зависит от разности температур $t'-t_0$ и от интервала, отделяющего температуру t' от температуры фазового перехода $t_к$. Для конденсаторов с верхним пределом рабочих температур $t_2 < t_к$ значение t' может быть взято равным t_2. Обратимую нестабильность λ тогда можно было бы определить, пользуясь следующим выражением

$$\lambda = \frac{C_0' - C_0}{C_0 (t' - t_0)} 100 \left[\frac{\%}{^{\circ}C}\right]. \qquad (187)$$

Эта величина, таким образом, характеризует обратимый „уход" емкости конденсатора после нагревания до предельной рабочей температуры и охлаждения.

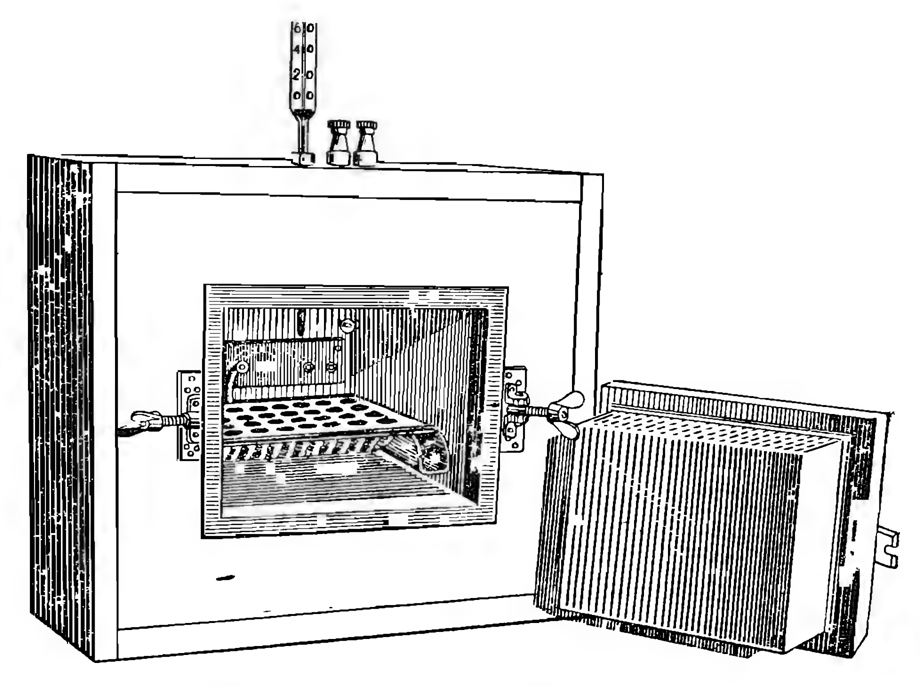
В известных случаях изменения свойств имеют необратимый характер; такие изменения принято называть старением. Однако изучение процессов старения, длящихся в условиях эксплуатации десятки месяцев, путем долгих наблюдений, мало пригодно для практики испытаний. Испытания на старение имеют целью оценить возможные изменения характеристик конденсатора после длительной эксплуатации.

В области производства и применения керамических линейных конденсаторов накоплен большой опыт, позволяющий создавать в лаборатории условия, имитирующие с известной степенью надежности эксплуатационные режимы и наблюдать изменения в свойствах, возникающие в действительности лишь после долгой работы. Длительность воздействия различных факторов в условиях эксплуатации компенсируется при лабораторных испытаниях более высокой интенсивностью воздействия этих факторов.

Аналогичные испытательные режимы для сегнетоконденсаторов представляется возможным наметить лишь в первом приближении. Для негерметизированных сегнетоконденсаторов из керамики на основе титаната бария применялись следующие испытания. После измерения при нормальных условиях основных величин, характеризующих свойства конденсатора, последний выдерживается в течение 250 часов под номинальным рабочим напряжением в камере тепла при температуре $t_{ис}$ выше нормальной; разность $t_к - t_{ис}$ выбирают, исходя из свойств керамики и условий работы конденсатора. После извлечения испытуемого конденсатора из камеры и охлаждения спустя 72 часа измеряют его емкость, добротность и сопротивление изоляции. Повидимому, можно считать допустимым уменьшение сопротивления изоляции вдвое, уменьшение добротности на 50% и изменение эффективной емкости на 10%. При испытании высоким напряжением той же величины, что и при первом испытании, не должны обнаруживаться частичные разряды. Данную методику нельзя считать приемлемой для всех видов сегнетокерамики; она нуждается в дальнейшем изучении и совершен-

ствовании применительно к особенностям керамики и различным условиям ее работы в аппаратуре.

Для создания температурных режимов удобно использовать небольшую камеру тепла и холода. Одна из таких камер (фиг. 131) имеет двойные стенки из дерева, расстояние между



Фиг. 131. Общий вид камеры тепла и холода

которыми (порядка 100 *мм*) заполнено асбестовой крошкой или мипором. Внутренняя поверхность камеры, а также поверхность съемной дверцы покрыта луженой листовой латунью. На задней стенке смонтирована панель с двумя парами зажимов: одна пара служит для включения электронагревателя, расположенного в нижней части камеры; вторая пара зажимов используется для термопары. Крышка камеры снабжена проходными изоляторами с вводами для присоединения конденсатора. Отрицательные температуры создают с помощью сухого льда, помещаемого в камеру. Температуры, получаемые в этой камере, лежат в пределах от —60 до + 120°.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. T. Jaynes, Ферроэлектричество, Princeton University Press., 1953.
2. Б. М. Коленко, Полярное электричество кварца, Петербург, 1884.
3. И. В. Курчатов, Сегнетоэлектрики, Гостехиздат, 1933.
4. Б. В. Горелик. Электрический пробой сегнетовой соли, ЖТФ, т. 10, в. 5, стр. 369, 1940.
5. М. Еремеев и Б. Курчатов, Электрические свойства изоморфных кристаллов, ЖЭТФ, т. 2, в. 5—6, стр. 329, 1932.
6. Б. М. Вул и И. М. Гольдман, Диэлектрическая проницаемость титанатов металлов второй группы, ДАН, т. 46, № 4, стр. 154, 1945.
7. Б. М. Вул и И. М. Гольдман, Диэлектрическая проницаеиость титаната бария в зависимости от напряженности в переменном поле, ДАН, т. 49, № 3, стр. 179, 1945.
8. Б. М. Вул и Л. Ф. Верещагин, Зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария от давления, ДАН, т. 48, № 9, стр. 662, 1945.
9. Б. М. Вул, Вещества с высокой и сверхвысокой диэлектрической проницаемостью, Электричество, № 3, стр 2, 1946.
10. В. Л. Гинзбург. О диэлектрических свойствах сегнетоэлектриков и титаната бария, ЖЭТФ, т. 15, в. 12, стр. 739, 1945.
11. E. Wainer, Диэлектрики с высоким содержанием титана, Trans. of the Electrochem. Soc., т. 89, стр. 331, 1946.
12. H. Hausner, Исследования по титанату бария в СССР, Ceramic Age, № 3, стр. 162, 1947.
13. А. X. Ишхнели, Диэлектрические свойства изоморфных смесей титаната бария, Сообщ. АН Груз. ССР, т. 11, № 5, стр. 275, 1950.
14. Г. А. Смоленский, Сегнетоэлектрики со структурой типа перовскит, Диссертация, Инст. химии силикатов АН СССР, 1954.
15. А. В. Ржанов, Пьезоэффект титаната бария. ЖЭТФ, т. 19, в. 6, стр. 502, 1949.
16. Г. И. Сканави, Диэлектрические свойства тетратитаната бария и других диэлектриков системы TiO_2 — BaO, ДАН СССР, т. 59, № 1, стр. 41, 1948.
17. В. Л. Гинзбург, Теория сегнетоэлектрических явлений, УФН, т. 38, в. 4, стр. 490, 1949.
18. Г. А. Смоленский и Р. Е. Пасынков, К вопросу о молекулярной теории сегнетоэлектриков, ЖЭТФ, т. 25, в. 1, с. 57, 1953.
19. Г. А. Смоленский и Р. Е. Пасынков, К термодинамической теории сегнетоэлектриков со структурой перовскит, ЖЭТФ, т. 24, в. 1, стр. 59, 1953.
20. Л. П. Холоденко и М. Я. Широбоков, Сегнетоэлектрические свойства кристаллов типа $BaTiO_3$ вблизи точки Кюри при наличии упругих напряжений, ЖЭТФ, в. 11, стр. 1250, 1951. См. также вып. 11, стр. 1239.
21. А. Е. Глауберман и А. Ф. Лубченко, К теории диэлектрических свойств титаната бария в стационарных полях, ЖЭТФ, т. 23, в. 2 (8), стр. 188, 1952.

22. В. Х. Козловский, О доменной структуре сегнетоэлектриков, ЖТФ, т. XXIII, в. 2, стр. 296, 1953.
23. Г. И. Сканави, Д. М. Казарновский и Г. Ф. Карташов, Новые типы высокочастотных керамических конденсаторов, Радиотехника, № 7—8, стр. 83, 1946.
24. Г. И. Сканави и В. И. Гончарова, Тибаровые материалы и конденсаторы, Сборник материалов по обмену производственно-техническим опытом, Материалы и радиодетали, Госэнергоиздат, 1948.
25. В. Вологдин, Новый генератор повышенных и высоких частот, Электричество, № 8, стр. 28, 1946.
26. Г. И. Сканави и М. Д. Нейман, Стабилизация напряжения с применением конденсаторов из титаната бария, Электричество, № 7, стр. 43, 1949.
27. Н. П. Богородицкий и Т. Н. Вербицкая, Электрические свойства сегнетокерамики вблизи точки Кюри, ЖТФ, т. 28, в. 12, стр 1920, 1952.
28. А. В. Ржанов, Титанат бария — новый сегнетоэлектрик. УФН, т. 38, в. 4, стр. 461, 1949.
29. Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков н Б. М. Тареев, Электротехнические материалы, Госэнергоиздат, 1955.
30. У. Кэди, Пьезоэлектричество и его практическое применение, Изд. иностранной литературы, 1949.
31. Г. И. Сканави, Физика диэлектриков, Гостехиздат, 1949.
32. П. Л. Калантаров и Л. Р. Нейман, Теоретические основы электротехники, Госэнергоиздат, 1955.
33. В. И. Оделевский, Аномальные свойства титаната бария и родственных ему изоморфных смесей, Материалы Всесоюзной научно-технической сессии по электрич. изоляции, 1948.
34. А. В. Ржанов, Спонтанная поляризация поликристаллических образцов титаната бария, ЖЭТФ, т. 19, в. 4, стр. 335, 1949.
35. Исследования по сегнетоэлектричеству (What's new in ferroelectricity), Ceramic. Ind., т. 64, № 6, с. 115, 116, 118—120, 1955.
36. Проблемы современной физики, Выпуск 6, Сегнетоэлектрические и антисегнетоэлектрические явления, Изд. иностранной литературы, 1953.
37. W. Mason, B. Mattias, Теоретическая модель для объяснения сегнетоэлектрических свойств титаната бария, Phys. Rev., т. 74, № 11, стр. 1622, 1948. См. также т. 74, стр. 1134, 1948.
38. J. Slater, Лоренцова поправка в титанате бария, Phys. Rev., т. 78, № 6, стр. 748, 1950.
39. Д. М. Казарновский, Изменение диэлектрических свойств сегнетокерамики со временем, ЖТФ, т. 22, в. 4, стр. 553, 1952.
40. A. von Hippel, R. Breckenridge, F. Chesley, Laszlo, Tisza, Керамика с высокой диэлектрической проницаемостью, Ind. and Eng. Chemistry, т. 38, № 11, стр. 1097, 1946.
41. Ф. С. Завельский, Исследование зависимости диэлектрической проницаемости титаната бария от длительности воздействия напряжения, ЖЭТФ, т. 25, в. 4, стр. 479, 1953.
42. Д. И. Маш, Потери и диэлектрическая проницаемость титаната бария в поле ультравысокой частоты, ЖЭТФ, т. 17, в. 6, стр. 537, 1947.
43. Н. С. Новосильцев и А. Л. Ходаков, Диэлектрические свойства титаната бария при высоких частотах, ЖТФ, т. 17, в. 6, стр. 651, 1947.
44. J. G. Powles, Диэлектрические свойства титанатов при СВЧ, Nature, т. 162, № 4120, стр. 614, 1948.
45. Н. С. Новосильцев, А. Л. Ходаков и М. С. Шульман, Влияние отклонений от стехиометрического состава на свойства керамики $BaTiO_3$ в сильных полях, ЖЭТФ, т. 23, в. 3 (9), стр. 336, 1952.
46. Г. П. Матулевич, И. Л. Фабелинский, Исследование акустического излучения титаната бария, ЖЭТФ, т. 25, в. 5, стр. 605, 1953.
47. В. Синяков и Б. К. Черный, Распределение потенциала

в метатитанате бария и других керамических диэлектриках, ЖТФ, т. XXII, в. 2, стр. 265, 1952.

48. Б. М. Вул, И. М. Гольдман и Р. Я. Разбаш. Электрическая прочность титанатов металлов второй группы таблицы Менделеева, ЖЭТФ, т. 20, в. 5, стр. 465, 1950.

49. В. И. Сарафанов, Электрическая прочность титанатов металлов II группы таблицы Д. И. Менделеева при постоянном и переменном ($f = 50$ *гц*) напряжении, ЖЭТФ, т 27, вып. 5 (11), стр. 590, 1954.

50. G. Sherane, S. Hoshino, K. Suzuki, Рентгенографические исследования фазового превращения в титанате свинца, Phys. Rev., т. 80, № 6, стр. 1105, 1950.

51. И. Н. Беляев и А. Л. Ходаков, Диэлектрические свойства монокристаллов титаната свинца, ЖЭТФ, т. 22, в. 3, стр. 376, 1952.

52. Е. Г. Фесенко, Доменное строение титаната свинца, ДАН, т. 88, № 5, стр. 785; 1953.

53. Г. А. Смоленский, А. И. Аграновская и Н. Н. Крайник, Сегнетоэлектрические свойства твердых растворов $BaTiO_3$—$PbZrO_3$, ДАН СССР, т. 91, № 1, стр. 55, 1953.

54. S. Roberts, Диэлектрические свойства цирконата свинца и твердых растворов цирконата свинца и бария, Journ. Americ. Cer. Soc., т. 33, № 2, стр. 63, 1950.

55. G. Shirane, E. Sawaguchi, Y. Takagi, Диэлектрические свойства цирконата свинца, Phys. Rev., т. 84, № 3, стр. 476, 1951.

56. Г. А. Смоленский и В. А. Исупов, Сегнетоэлектрические свойства твердых растворов станната бария в титанате бария, ЖТФ, т. 24, в. 8, стр. 1375, 1954.

57. Г. А. Смоленский, Н. П. Тарутин и Н. П. Грудцин, Сегнетоэлектрические свойства твердых растворов цирконата бария в титанате бария, ЖТФ, т. 24, в. 9, стр. 1584, 1954.

58. У. Мезон, Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультраакустике, ИИЛ, 1952.

59. H. Donley, Диэлектрические свойства титанатов бария и стронция в зависимости от напряженности поля, R. C. A. Rev., т. 8, № 3, стр. 539, 1947.

60. Г. А. Смоленский и К. И. Розгачев, Сегнетоэлектрические свойства твердых растворов в системе титанат бария—титанат стронция, ЖТФ, т. 24, в 10, с. 1751, 1954.

61. E. Bunting, G. Shelton, A. Creamer, Диэлектрические свойства твердых растворов титанатов кальция и бария, Journ. Res. Nat. Bur. Stand., т. 43, № 3, стр. 237, 1949.

62. Д. М. Казарновский, Исследование ионизации в сегнетокерамических конденсаторах, Сборник трудов Ленингр. Заочного Индустриального ин-та № 1, 1955.

63. Н. П. Богородицкий и И. Д. Фридберг, Конструирование и расчет мощных керамических конденсаторов, Электричество, № 11, стр. 50, 1946.

64. Д. М. Казарновский, Расчет нелинейных конденсаторов, Электричество, № 8, стр. 60, 1952.

65. В. Т. Ренне, Электрические конденсаторы, Госэнергоиздат, 1952.

66. Д. М. Казарновский и Л. А. Фоменко, Сегнетоконденсаторы для подавления помех радиоприему, Радиотехника, т. 9, № 5, стр. 44, 1954.

67. Д. М. Казарновский, Магнитноуправляемый емкостный удвоитель частоты, Авторское свидетельство № 98548 от 17. VII 1954 г. с приоритетом от 25. XII 1951 г.

68. Е. В. Синяков, Е. А. Стафийчук и Л. С. Синегубова, Влияние смещающего поля на ε и $\operatorname{tg}\delta$ в $BaTiO_3$, ЖЭТФ, т. 21, в. 12, стр. 1396, 1951.

69. Д. М. Казарновский, Сегнетокерамика в электротехнической аппаратуре, Электричество, № 2, стр. 40, 1954.

70. М. Е. Аршанский, Керамические конденсаторы малой реактивной мощности, Госэнергоиздат, 1953.

71. Ф. Е. Евтеев и В. А. Жуков, Технология радиоаппаратуры, Госэнергоиздат, 1952.

72. Э. К. Келер и А. К. Кузнецов, Комплексный термический анализ силикатов, ДАН, т. 88, № 6, стр. 1031, 1953.

73. Д. М. Казарновский, Электрическая печь для сегнетокерамики и огнеупоров, Зав. лаборатория, № 2, стр. 251, 1950.

74. G. Howatt, R. Brechenridge, J. Brownlow, Производство тонких керамических листочков для конденсаторов, Journ. Cer. Soc., т. 30, № 8, стр. 237, 1947.

75. Н. П. Богородицкий, Н.Л. Полякова, Г.К. Кириллова, А. М. Эйделькинд, Новые виды электротехнической керамики, Электричество, № 7, стр. 56, 1954.

76. В. Т. Ренне, Развитие отечественного конденсаторостроения, Электричество, № 7, стр. 114, 1955.

77. Н. П. Богородицкий и И. Д. Фридберг, Новые разработки в области керамических конденсаторов низкого напряжения, Электричество, № 6, стр. 37, 1955.

78. Т. Н. Вербицкая, Сегнетокерамика с резко выраженными нелинейными свойствами, ДАН СССР, т. 100, стр. 29, 1955.

79. Д. М. Казарновский, О неравновесной емкости сегнетоконденсатора во время его разряда, ЖТФ, т. 23, в. 10, стр. 1712, 1953.

80. Н. П. Богородицкий (ред.), Руководство к лаборатории электротехнических материалов, Изд. ЛЭТИ, 1953.

81. А. В. Фремке (ред.), Электрические измерения, Госэнергоиздат, 1953.

82. К. Б. Карандеев, Методы электрических измерений, Госэнергоиздат, 1952.

83. Д. М. Казарновский, Испытания радиотехнических материалов и деталей, Госэнергоиздат, 1953.

84. В. В. Карпихин, Техника измерений электрических параметров конденсаторов, Госэнергоиздат, 1955.

85. А. А. Тюльпанов, Технология производства кварцевых пластин, Госэнергоиздат, 1955.

86. H. Sachse, Сегнетоэлектрики, Berlin, 1956.

87. Труды всесоюзного совещания по сегнетоэлектричеству, Изд. АН СССР, 1956.

88. A. Hersping, Сегнетоэлектрические материалы, ETZ-A, 1956, № 2.

ОГЛАВЛЕНИЕ